

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



ΤΙΤΛΟΣ:

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+
ΣΕ ΦΥΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ
ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΚΑΒΟΥΡΑΣ ΣΠΥΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΚΙΤΤΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΒΟΛΟΣ, 2004



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.:	4185/1
Ημερ. Εισ.:	14-12-2004
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	Δ
	631.585
	KAB

ΤΙΤΛΟΣ:

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}
ΣΕ ΦΥΤΙΚΑ ΜΕΡΗ ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ
ΤΡΙΑΝΤΑΦΥΛΛΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΣΕ ΚΛΕΙΣΤΑ
ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Κ. Κίττας (Επιβλέπων)	Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Γεωργικές Κατασκευές
Ι. Μήτσιος (Μέλος)	Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Εδαφολογία – Χημεία-Γονιμότητα
	Εδάφους
Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη (Μέλος)	Καθηγήτρια
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας	Αρδεύσεις, Στραγγίσεις και Υδραυλική

Στους Γονείς μου,

**Κόστα και Ευαγγελία για την ηθική και
υλική υποστήριξη που μου παρείχαν
καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου, στον Κο Κωνσταντίνο Κίττα Καθηγητή του Τμήματος Γεωπονίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το γνωστικό αντικείμενο των Γεωργικών Κατασκευών, καθώς και για την ηθική και υλικοτεχνική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων και συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Εν συνεχεία Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής, κ.κ. Ι. Μήτσιο Καθηγητή Εδαφολογίας και την Κα Μ. Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη Καθηγήτρια Αρδεύσεων-Στραγγίσεων του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και τη συμβολή τους στην άρτια διαμόρφωση και ολοκλήρωση της εν λόγω διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης τους Κο Χρήστο Λύκα, Υποψήφιο Διδάκτορα του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Τμήματος Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας και τον Δρ Παναγιώτη Γιαγλάρα, για τη συνεχή επιστημονική καθοδήγηση και για την πολύτιμη συμβολή τους στην αρτιότερη οργάνωση του πειράματος και συγγραφή της παρούσας διατριβής, η οποία και υπήρξε καθοριστική.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω το φίλο μου και Μεταπτυχιακό φοιτητή του Εργαστηρίου Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος κ. Γ. Δημόκα για την ηθική συμπαράσταση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε στην περάτωση της πτυχιακής διατριβής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια η τεχνική της υδροπονίας εφαρμόζεται ολοένα και περισσότερο στην παραγωγή θερμοκηπιακών καλλιεργειών λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που εμφανίζει. Την τελευταία δεκαετία υπήρξε σημαντική στροφή προς τα κλειστά υδροπονικά συστήματα, κυρίως λόγω της ευαισθητοποίησης των ενδιαφερόμενων φορέων για την προστασία του περιβάλλοντος (μείωση των ρύπων) αλλά και λόγω δυνατότητας βελτιστοποίησης των συντελεστών παραγωγής (εξοικονόμηση νερού, λιπασμάτων και φυτοπροστατευτικών προϊόντων). Το σημαντικότερο μειονέκτημα που εμφανίζουν τα κλειστά κλειστά συστήματα είναι η δυσκολία στη διαχείριση και στον έλεγχο του θρεπτικού διαλύματος, όσον αφορά αφενός μεν τη διατήρηση των συγκεντρώσεων των απαραίτητων στοιχείων στα βέλτιστα επίπεδα για την ανάπτυξη των φυτών, αφετέρου δε τη διατήρηση των παραμέτρων του θρεπτικού διαλύματος στην περιοχή της ρίζας (EC, pH) σε ένα εύρος τιμών ανεκτών από την καλλιέργεια.

Η μέχρι τώρα πρακτική ρύθμισης της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος βασίζεται στη ρύθμιση των βασικών παραμέτρων του θρεπτικού διαλύματος: pH και EC, στην τακτική εργαστηριακή ανάλυση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος και του νερού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την άρδευση (όσον αφορά τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται διεθνώς, η τάση ανάπτυξης και εφαρμογής έμπειρων συστημάτων τα οποία ενσωματώνουν μοντέλα προσομοίωσης ανάπτυξης της καλλιέργειας και μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των υποστρωμάτων. Με τα συστήματα αυτά επιχειρείται η καλύτερη παρακολούθηση της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών και ο προσδιορισμός των αναγκών της καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία και νερό σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες ανάγκες της καλλιέργειας. Επιτρέπουν δε τη ρύθμιση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος με απ' ευθείας έλεγχο της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα και όχι έμμεσα με τον έλεγχο της EC. Στα συστήματα αυτά είναι μεγάλης σημασίας η εισαγωγή του χρόνου ως παράμετρο ελέγχου του θρεπτικού διαλύματος, όσον αφορά τη χρονική κλίμακα του ελέγχου, καθώς και ο καθορισμός του χρόνου απόκρισης (διαστημάτων μεταξύ δυο διαδοχικών ελέγχων) των συστημάτων, προκειμένου η εκτέλεση των αποφάσεων από τη μονάδα ελέγχου να γίνεται στο βέλτιστο χρόνο.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να διερευνήσει τη συμπεριφορά φυτών τριανταφυλλιάς ανεπτυγμένα σε υδροπονική καλλιέργεια, ως προς τη δυνατότητα ή μη, επανάκτησης των βέλτιστων επιπέδων Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ ύστερα από έκθεσή τους σε συνθήκες έλλειψης των τριών στοιχείων και κατ' επέκταση ο προσδιορισμός του χρόνου επέμβασης για την διόρθωση των τιμών των παραπάνω στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα. Για το σκοπό αυτό φυτά τριανταφυλλιάς αναπτύχθηκαν σε θρεπτικά διαλύματα με έλλειψη Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ και μετρήθηκε η περιεκτικότητά (% Ξ.Β) των παραπάνω θρεπτικών στοιχείων στα διάφορα φυτικά μέρη (φύλλα, άνθη, βλαστοί, ρίζες), ύστερα από 1, 3 και 7 ημέρες έλλειψης και μετά από 1, 3 και 7 ημέρες επανατροφοδότησης με πλήρες θρεπτικό διάλυμα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων έδειξαν ότι φυτά τριανταφυλλιάς ανεπτυγμένα σε υδροπονική καλλιέργεια, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ , ακόμα και μετά από 7 ημέρες έλλειψης των παραπάνω θρεπτικών στοιχείων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΜΕΡΟΣ 1 ^ο – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο . – ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	7
1.1 Γενικά	7
1.2 Υποστρώματα στην Υδροπονία.....	9
1.2.1 Χημικώς ενεργά υποστρώματα.....	10
1.2.2 Αδρανή υποστρώματα	12
1.3 Διάκριση Υδροπονικών συστημάτων ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος.....	13
1.3.1 Ανοιχτό υδροπονικό σύστημα	13
1.3.2 Κλειστό υδροπονικό σύστημα	14
1.3.2.1 Αναγκαιότητα του κλειστού υδροπονικού συστήματος	16
1.3.2.2 Προβλήματα εφαρμογής των κλειστών υδροπονικών συστημάτων	17
1.4 Μέθοδοι υδροπονικών καλλιέργειών	19
1.4.1 Μέθοδοι χωρίς τη χρήση υποστρώματος.....	19
1.4.1.1 Μέθοδος Deep Flow Technique	19
1.4.1.2 Nutrient Film Technique.....	21
1.4.1.3 Αεροπονία.....	22
1.4.2 Μέθοδοι βασιζόμενες στη χρήση υποστρώματος.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο . – ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ.....	26
2.1 Γενικά	26
2.2 Εξοπλισμός διαχείρισης θρεπτικού διαλύματος σε κλειστά υδροπονικά συστήματα	28
2.2.1 Σύστημα A/B	29
2.2.2. Σύστημα πολλαπλών δεξαμενών	32
2.3. Δυσκολίες στη διαχείριση θρεπτικού διαλύματος.....	33
2.4 Στρατηγικές διαχείρισης θρεπτικού διαλύματος σε κλειστά υδροπονικά συστήματα	38
2.4.1 Παρασκευή θρεπτικού διαλύματος με προεπιλεγόμενη αναλογία μίξης απορρέοντος διαλύματος- νερού	40
2.4.2 Παρασκευή θρεπτικού διαλύματος με ρυθμιζόμενη αναλογία μίξης απορρέοντος διαλύματος- νερού	41
2.4.2.1 Προσθήκη των λιπασμάτων σε συγκεκριμένη ποσότητα του νερού δικτύου πριν τη μίξη με το διάλυμα απορροής.....	41
2.4.2.2 Μίξη του απορρέοντος διαλύματος και του νερού δικτύου, πριν την προσθήκη των λιπασμάτων	42
2.4.3 Παρασκευή θρεπτικού διαλύματος με αυτόματα μεταβαλλόμενη αναλογία έγχυσης λιπασμάτων	44
2.5 Εφαρμογή αυτοματισμών στα κλειστά υδροπονικά συστήματα.....	44
ΜΕΡΟΣ 2 ^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο . ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	50
3.1 Περιγραφή θερμοκηπίου.....	50
3.2 Περιγραφή καλλιέργειας.....	51
3.3 Πειραματική διάταξη	53
3.4 Μετρήσεις.....	54
3.5 Επεξεργασία δεδομένων	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο . ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	58

4.1	Κλιματικοί παράγοντες.....	58
4.2	Συγκεντρώσεις Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} στα θρεπτικά διαλύματα.....	60
4.3	Συγκεντρώσεις Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} στα διάφορα φυτικά μέρη.....	62
4.3.1	Αποτελέσματα 1 ^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης Ca^{2+}	62
4.3.2	Αποτελέσματα 1 ^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης Mg^{2+} ...	64
4.3.3	Αποτελέσματα 1 ^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης K^{+}	66
4.3.4	Αποτελέσματα 2 ^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης Ca^{2+}	68
4.3.4.1	Φύλλα	68
4.3.4.2	Άνθη.....	70
4.3.4.3	Βλαστοί.....	72
4.3.4.4	Ρίζες	74
4.3.5	Αποτελέσματα 2 ^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης Mg^{2+} ...	76
4.3.5.1	Φύλλα	76
4.3.5.2	Άνθη.....	78
4.3.5.3	Βλαστοί.....	80
4.3.5.4	Ρίζες	82
4.3.6	Αποτελέσματα 2 ^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης K^{+}	84
4.3.6.1	Φύλλα	84
4.3.6.2	Άνθη.....	86
4.3.6.3	Βλαστοί.....	88
4.3.6.4	Ρίζες	90
4.4	Μεταβολές Ξηρού Βάρους	92
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο . ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....		95
5.1	Επίδραση της έλλειψης Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} στην περιεκτικότητα των διαφόρων φυτικών μερών στα παραπάνω θρεπτικά στοιχεία	95
5.2	Επίδραση της έλλειψης Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} στην παραγωγή Ξηρού Βάρους....	97
5.3	Προοπτικές	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		100

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η υδροπονία είναι μια πολύ πρόσφατη τεχνική παραγωγής θερμοκηπιακών κυρίως προϊόντων, η οποία εφαρμόζεται σε εμπορική κλίμακα περίπου τα τελευταία 30 χρόνια. Ο όρος “Υδροπονία” συμπεριλαμβάνει όλες εκείνες της τεχνικές κατά τις οποίες η καλλιέργεια των φυτών πραγματοποιείται εκτός εδάφους και στις οποίες η θρέψη των φυτών βασίζεται στη χρήση θρεπτικού διαλύματος.

Τα δυο βασικά συστήματα υδροπονικής καλλιέργειας που έχουν αναπτυχθεί με βάση τη διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος, είναι το ανοικτό και το κλειστό σύστημα. Στο ανοικτό υδροπονικό σύστημα το θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται απορρίπτεται μετά το τέλος της άρδευσης, ενώ στο κλειστό το πλεονάζον θρεπτικό διάλυμα που απομακρύνεται από το χώρο των ριζών συλλέγεται, διορθώνεται και επαναχρησιμοποιείται στην ίδια την καλλιέργεια. Την τελευταία δεκαετία υπήρξε σημαντική στροφή προς την εφαρμογή κλειστών υδροπονικών συστημάτων, κυρίως λόγω του γενικότερου ενδιαφέροντος για την προστασία του περιβάλλοντος. Με την επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος εξοικονομείται σημαντική ποσότητα λιπασμάτων και νερού, ενώ επιβαρύνεται λιγότερο το περιβάλλον με χημικά απόβλητα. Μελέτες έδειξαν ότι η εξοικονόμηση νερού και λιπασμάτων μπορεί να είναι πάνω από 30% και 40 %, αντίστοιχα. Εκτός των οικολογικών προεκτάσεων, τα κλειστά συστήματα κερδίζουν ολοένα έδαφος γιατί επιδέχονται σε μεγάλο βαθμό την αυτοματοποίηση ολόκληρου του συστήματος.

Παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα κλειστά υδροπονικά συστήματα, παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα. Το σημαντικότερο μειονέκτημα έγκειται στα προβλήματα της διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος και συγκεκριμένα στη δυνατότητα άμεσου ελέγχου και ρύθμισης της σύνθεσής του. Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος που καθορίζεται από τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων μέσα σε αυτό, μετά την πρώτη εφαρμογή του στην καλλιέργεια, μπορεί να διαφέρει σημαντικά από αυτήν που είχε κατά την παρασκευή του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) στο θρεπτικό διάλυμα. Η μεταβολή της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος κατά την εφαρμογή του στην καλλιέργεια οφείλεται:

- Στην επιλεκτική απορρόφηση θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά
- Στις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στο χώρο του θερμοκηπίου, (ακτινοβολία, θερμοκρασία, υγρασία, συγκέντρωση CO₂) οι οποίες επιδρούν στις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών (φωτοσύνθεση, διαπνοή, αναπνοή)
- Στις διαφορετικές απαιτήσεις που έχουν τα φυτά σε θρεπτικά στοιχεία, σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης

Η συνεχής αλλαγή της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος μετά από κάθε εφαρμογή του στην καλλιέργεια, κάνουν αδύνατη την άμεση και απ' ευθείας επαναχρησιμοποίηση του απορρέοντος διαλύματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αποτελεί αναγκαιότητα διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος σε κάθε κύκλο άρδευσης της καλλιέργειας, όσον αφορά:

- Την κατάρτιση προγραμμάτων άρδευσης (χρόνος και διάρκεια)
- και
- Τον προσδιορισμό της ακριβούς σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος

Προς το παρόν δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα ο απαραίτητος εξοπλισμός ο οποίος να καθιστά σε πραγματικό χρόνο δυνατή τη μέτρηση των συγκεντρώσεων των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα. Αυτό θα μπορούσε να αυτοματοποιήσει τη διαδικασία διόρθωσης του θρεπτικού διαλύματος στα κλειστά υδροπονικά συστήματα, μετά από κάθε εφαρμογή του στην καλλιέργεια. Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται μέχρι σήμερα για τη σταθεροποίηση της σύνθεσης των θρεπτικών διαλυμάτων σε κάθε κύκλο άρδευσης είναι η ανάμιξη του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος με πρότυπα διαλύματα (σταθερής σύστασης) ή ο έλεγχος της αναλογίας των θρεπτικών στοιχείων σε αυτό. Σε όλες τις περιπτώσεις η διόρθωση του θρεπτικού διαλύματος βασίζεται στην τακτική εργαστηριακή ανάλυση της σύνθεσης του απορρέοντος διαλύματος.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται διεθνώς η τάση ανάπτυξης και εφαρμογής έμπειρων συστημάτων τα οποία ενσωματώνουν μοντέλα προσομοίωσης ανάπτυξης της καλλιέργειας και μοντέλα που περιγράφουν τη συμπεριφορά των υποστρωμάτων. Με τα συστήματα αυτά επιχειρείται η παρακολούθηση της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών και ο προσδιορισμός των αναγκών της καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία και νερό σύμφωνα με τις μεταβαλλόμενες κλιματικές συνθήκες και το στάδιο ανάπτυξης των φυτών. Επιτρέπουν δε τη

ρύθμιση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος, ρυθμίζοντας απ' ευθείας τις αναλογίες των θρεπτικών στοιχείων σε αυτό και όχι έμμεσα με τη ρύθμιση της EC.

Στα συστήματα αυτά η εισαγωγή του χρόνου ως παράμετρο έχει μεγάλη σημασία, προκειμένου η εκτέλεση των αποφάσεων από τη μονάδα ελέγχου να γίνεται στο σωστό χρόνο. Επομένως είναι αναγκαίο να καθοριστεί για κάθε καλλιέργεια ξεχωριστά, το χρονικό διάστημα που πρέπει να μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών ελέγχων της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος προκειμένου η προσθήκη των θρεπτικών στοιχείων, η οποία πραγματοποιείται με γνώμονα τη μείωση των εισροών, να λαμβάνει χώρα έγκαιρα και να παραμένει συντονισμένη προς τις ανάγκες της καλλιέργειας.

Η παρούσα διατριβή, εκπονήθηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος CloSys (Closed Systems for water and nutrient management in Horticulture-Contract N° QLK5-CT-2000-01301), του οποίου το πεδίο έρευνας άπτεται στην ανάπτυξη ενός έμπειρου συστήματος για την ολοκληρωμένη διαχείριση (έλεγχος-ρύθμιση) του θρεπτικού διαλύματος σε κλειστά υδροπονικά συστήματα. Σκοπός της παρούσας διατριβής ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς φυτών τριανταφυλλιάς εγκατεστημένα σε υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, όσον αφορά τη δυνατότητα ή μη, επανάκτησης των βέλτιστων επιπέδων Ca^{+2} , Mg^{+2} και K^{+} , ύστερα από έκθεσή τους σε συνθήκες έλλειψης. Παράλληλα εκτιμήθηκε το μέγιστο χρονικό διάστημα που πρέπει να μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών ελέγχων για τη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη αύξηση και ανάπτυξη των φυτών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για φυτά τριανταφυλλιάς, η έκθεση σε συνθήκες έλλειψης μέχρι 7 ημέρες και για τα τρία κατιόντα, είναι ικανή να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στα επίπεδα αυτών των κατιόντων στα διάφορα φυτικά μέρη, καθώς και στην παραγωγή βιομάζας. Η περιεκτικότητα των διαφόρων φυτικών μερών σε Ca^{+2} , Mg^{+2} και K^{+} , επανέρχεται στα βέλτιστα επίπεδα μετά από επανατροφοδότηση των φυτών με πλήρες θρεπτικό διάλυμα. Ομοίως μετά την περίοδο επανατροφοδότησης παύουν να υφίσταται οι διαφορές στην παραγωγή ξηράς ουσίας.

ΜΕΡΟΣ 1^ο – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο. – ΥΔΡΟΠΟΝΙΚΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ

1.1 Γενικά

Με τον όρο “υδροπονικές καλλιέργειες” καλούμε τις καλλιέργειες εκείνες φυτών, που πραγματοποιούνται εκτός εδάφους και στις οποίες τα φυτά αναπτύσσονται είτε σε στερεά υποστρώματα τα οποία τροφοδοτούν τα φυτά με κατάλληλο θρεπτικό διάλυμα, είτε απ’ ευθείας στο θρεπτικό διάλυμα από το οποίο τα φυτά παίρνουν την απαραίτητη ποσότητα νερού και θρεπτικών στοιχείων.

Στη διεθνή βιβλιογραφία όλες αυτές οι μέθοδοι καλλιέργειας συνήθως χαρακτηρίζονται με τους όρους “**καλλιέργειες εκτός εδάφους**” (Soiless culture) και “**Υδροπονία**” (Hydroponics). Μερικοί ερευνητές (Cooper, 1979) κάνοντας μια αυστηρή εννοιολογική ερμηνεία, της προερχόμενης από την ελληνική γλώσσα λέξης υδροπονία, θεωρούν τον όρο αυτό κατάλληλο για το χαρακτηρισμό ενός μόνο μέρους των μεθόδων καλλιέργειας φυτών εκτός εδάφους και συγκεκριμένα εκείνων στις οποίες δε χρησιμοποιείται κανένα στερεό υπόστρωμα π.χ. το σύστημα NFT (Nutrient Film Technique = Τεχνική λεπτής θρεπτικής στοιβάδας). Οι περισσότεροι ειδικοί επιστήμονες (Steiner, 1976) όμως, χρησιμοποιούν τον όρο υδροπονία ως απολύτως συνώνυμο με το χαρακτηρισμό “καλλιέργεια εκτός εδάφους”. Ένας άλλος όρος που χρησιμοποιείται στην ειδική βιβλιογραφία είναι η λέξη **υδροκαλλιέργεια (water culture)** που χαρακτηρίζει τις καλλιέργειες φυτών που λαμβάνουν χώρα σε καθαρό θρεπτικό διάλυμα, χωρίς τη χρήση υποστρώματος.

Ο όρος “υδροπονία” χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Gericke (1937) ο οποίος ήταν ο πρώτος ερευνητής που διεξήγαγε πειράματα για την εφαρμογή της τεχνικής σε εμπορική κλίμακα. Πριν από τη δεκαετία του 1930 αλλά και μέχρι τα τέλη του 1960 οι περισσότερες από τις εφαρμογές της υδροπονίας αφορούσαν εργαστηριακά πειράματα για τη μελέτη της θρέψης των φυτών και τη σημασία των στοιχείων στην ανάπτυξη αυτών (Khor, 1860). Από τις αρχές της δεκαετίας του ’70 άρχισε συνεχώς να αυξάνεται το ενδιαφέρον για την εφαρμογή της υδροπονίας στην παραγωγή λαχανοκομικών και ανθοκομικών φυτών σε εμπορική κλίμακα. Η τάση αυτή υπήρξε κυρίαρχη στις βορειοευρωπαϊκές χώρες (Ολλανδία, Ηνωμένο Βασίλειο και Σκανδιναβικές χώρες). Ο κύριος λόγος που

οδήγησε στην εντυπωσιακή αύξηση των εκτάσεων υδροπονικών καλλιεργειών είναι η δυνατότητα που δίδεται με την εφαρμογή των συστημάτων αυτών να αποφεύγονται τα προβλήματα που σχετίζονται με την καλλιέργεια στο έδαφος όπως: οι εδαφογενείς ασθένειες, η προοδευτική υποβάθμιση της δομής και της γονιμότητας του εδάφους από τη συνεχή χρήση του (συσσώρευση αλάτων) καθώς και το κόστος καλλιέργειας του εδάφους. Επιπλέον με τη χρήση των συστημάτων αυτών είναι δυνατή η αξιοποίηση περιοχών για εγκατάσταση θερμοκηπιακών καλλιεργειών, με αλατούχα ή/και νατριωμένα εδάφη στα οποία η καλλιέργεια είναι ανέφικτη ή προβληματική.

Ωστόσο ο σημαντικότερος παράγοντας που έκανε την υδροπονία ευρέως διαδεδομένη και προσιτή σε όλους τους παραγωγούς παγκοσμίως είναι η ανακάλυψη και χρήση των πλαστικών στη γεωργία και η μεγάλη και ταχεία ανάπτυξη της αντίστοιχης βιομηχανίας. Σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη και διάδοση της υδροπονίας, αποτέλεσε και η μεγάλη πρόοδος στον τομέα των θερμοκηπιακών κατασκευών και του ελέγχου του περιβάλλοντος σε συνδυασμό με την ανάπτυξη πλήρως αυτοματοποιημένων συστημάτων και την εφαρμογή των Η/Υ στη γεωργία.

Στην υδροπονία, η μοναδική πηγή θρεπτικών στοιχείων για τα φυτά είναι το θρεπτικό διάλυμα. Η σημαντικότερη συνεπώς διαφορά μεταξύ υδροπονικών καλλιεργειών και καλλιεργειών σε φυσικό έδαφος, εντοπίζεται στην πηγή προέλευσης των θρεπτικών στοιχείων και στον όγκο του διαθέσιμου χώρου για ανάπτυξη του ριζικού συστήματος των φυτών, καθώς και στην ομοιομορφία του μέσου ανάπτυξης του ριζοστρώματος. Στις υδροπονικές καλλιέργειες ο διαθέσιμος χώρος για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος ανά φυτό είναι πολύ περιορισμένος π.χ. 14 L m^{-2} σε πετροβάμβακα ενώ σε φυσικό έδαφος 500 L m^{-2} (Sonneveld, 1981). Για το λόγο αυτό στις υδροπονικές καλλιέργειες τα αποθέματα θρεπτικών στοιχείων και νερού είναι περιορισμένα (Bar-Tal, 1999). Ο παράγοντας αυτός δεν αποτελεί μειονέκτημα σε σχέση με τη συμβατική καλλιέργεια των φυτών στο έδαφος, διότι λόγω του περιορισμένου όγκου του ριζοστρώματος και λόγω της ομοιομορφίας της σύνθεσης των περισσοτέρων υποστρωμάτων (βιομηχανικά τυποποιημένα), επιτυγχάνεται άμεση και καλύτερη διαχείριση των θρεπτικών στοιχείων και του νερού, οδηγώντας σε βελτιστοποίηση της παραγωγής και της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων.

Η διάκριση των υδροπονικών συστημάτων γίνεται ανάλογα με:

- Το είδος του υποστρώματος που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των φυτών
- Τον τρόπο διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος

1.2 Υποστρώματα στην Υδροπονία

Στις υδροπονικές καλλιέργειες, το υπόστρωμα αποτελεί ένα υποκατάστατο του εδάφους και επομένως θα πρέπει να είναι σε θέση να επιτελεί όλες τις λειτουργίες του εδάφους και μάλιστα με το βέλτιστο τρόπο. Μόνο όταν εκπληρώνεται αυτή η προϋπόθεση, είναι οικονομικά σκόπιμη η χρήση υποστρώματος αντί της καλλιέργειας στο έδαφος. Η πρακτική σημασία της χρήσης των υποστρωμάτων αφορά αφενός την στήριξη του φυτού και αφετέρου τη συγκράτηση θρεπτικών στοιχείων που προέρχονται από το θρεπτικό διάλυμα. Στις περιπτώσεις των υδροπονικών συστημάτων όπου εφαρμόζεται η τεχνική της υδροκαλλιέργειας (π.χ. NFT), το ρόλο του εδάφους καλείται να παίξει το ίδιο το θρεπτικό διάλυμα, ενώ η στήριξη των φυτών παρέχεται από το σύστημα παροχής και κυκλοφορίας του θρεπτικού διαλύματος ή από ξεχωριστό σύστημα (π.χ. δέσιμο φυτών σε κατάλληλη θέση).

Ως υποστρώματα στην υδροπονία μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα εκείνα τα υλικά που παρουσιάζουν συγκεκριμένες φυσικοχημικές ιδιότητες, επιθυμητές τόσο για τη σωστή ανάπτυξη των φυτών, όσο και για την ευκολία διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος.

Συγκεκριμένα ένα υλικό που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα στην υδροπονία θα πρέπει:

- Να έχει ικανοποιητική αναλογία νερού-αέρα στην κατάσταση της υδατοϊκανότητας και μεγάλη ικανότητα συγκράτησης νερού
- Να έχει σταθερή τιμή PH
- Να έχει μικρή περιεκτικότητα σε άλατα.
- Να επιτρέπει την ομαλή κυκλοφορία του θρεπτικού διαλύματος.
- Να έχει χημική αδράνεια.
- Να έχει μηδενική ή ελάχιστη εναλλακτική ικανότητα.
- Να επιτρέπει την εύκολη μεταχείριση του.

- Να είναι απαλλαγμένο από παθογόνους μικροοργανισμούς.
- Να μην περιέχει στοιχεία τοξικά για τα φυτά.
- Να είναι ασυμπίεστο και να μην αλλάζει την υφή και την σύστασή του.
- Να μην πληγώνει τις ρίζες των φυτών.

Τα συνηθέστερα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα ως υποστρώματα στην υδροπονία ταξινομούνται με βάση την επίδραση που ασκούν στη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος, σε δυο κατηγορίες: στα **χημικώς ενεργά** υλικά και στα απολύτως **αδρανή**.

Στην πράξη τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως ως υποστρώματα είναι ο περλίτης, ο βερμικουλίτης, ο πετροβάμβακας, η τύρφη και το κοκκόχωμα.

1.2.1 Χημικώς ενεργά υποστρώματα

Τα χημικώς ενεργά υποστρώματα (π.χ. Βερμικουλίτης) παρουσιάζουν αξιόλογη Ικανότητα Ανταλλαγής Κατιόντων (ΙΑΚ), ασκώντας κατ' αυτόν τον τρόπο σημαντική επίδραση στη σύσταση του θρεπτικού διαλύματος που εφαρμόζεται στην καλλιέργεια. Η ιδιαιτερότητά τους αυτή σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στις υδροπονικές καλλιέργειες ο διαθέσιμος όγκος υποστρώματος ανά φυτό, για την ανάπτυξη του ριζικού συστήματος, είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με το φυσικό έδαφος, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα υποστρώματα αυτά υπερτερούν έναντι του φυσικού εδάφους κυρίως λόγω της ομοιομορφίας τους και της απαλλαγής τους από φυτοπαθογόνους μικροοργανισμούς. Στα χημικώς ενεργά υποστρώματα δεν είναι εφικτή η απόλυτη ρύθμιση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος, οπότε δεν επιτυγχάνεται ο πλήρης έλεγχος της θρέψης. Μια υποκατηγορία των χημικώς ενεργών υποστρωμάτων είναι τα **οργανικά** υποστρώματα (π.χ. τύρφη) τα οποία εκτός της ΙΑΚ που διαθέτουν, παρουσιάζουν ασταθή δομή και σύσταση λόγω της προοδευτικής τους αποσύνθεσης εξαιτίας της ανοργανοποίησης της οργανικής ουσίας που περιέχουν.

Τύρφη

Η τύρφη είναι οργανικό υλικό που αποτελείται από μερικώς αποδομημένα υπολείμματα φυτών. Η τύρφη είναι υλικό που περιέχει 98% οργανική ουσία. Είναι δυνατόν να αποικοδομηθεί περαιτέρω κατά την διάρκεια της καλλιέργειας με

ρυθμό που δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί, απελευθερώνοντας άγνωστης ποσότητας θρεπτικά στοιχεία στο θρεπτικό διάλυμα. Το pH της τύρφης διαλυμένης σε νερό είναι 3,5-4, η πυκνότητά της είναι 60-100 Kgr m⁻³ και το ολικό πορώδες είναι 96%. Η εναλλακτική ικανότητα της τύρφης είναι 100-130 meq/100g. Μπορεί να συγκρατήσει ποσότητα νερού 2πλάσια του βάρους της σε ξηρή κατάσταση και ίση με το βάρος της σε υγρή. Η τύρφη όταν χρησιμοποιείται μόνη της ως υπόστρωμα στην υδροπονία, είναι δυνατόν να δημιουργήσει ασφυκτικές συνθήκες στη ρίζα των φυτών και ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται μεγάλος όγκος νερού κατά την άρδευση ή όταν δεν υπάρχει μεγάλος ρυθμός αποστράγγισης ή διαπνοής. Αντίθετα, ή στεγνή τύρφη δεν διαβρέχεται ομοιόμορφα κατά την άρδευση.

Βερμικουλίτης

Ο βερμικουλίτης αποτελεί ένωση αλουμινίου-σιδήρου και μαγνησίου. Ο διογκωμένος βερμικουλίτης παρουσιάζει καλή αναλογία συγκράτησης νερού-αέρα. Έχει φαινομενική πυκνότητα 0,1 g cm⁻³, ενώ μπορεί να συγκρατήσει ποσότητα νερού ίση με 3-4 φορές το βάρος του.(Ravin κ ά, 2002) Το PH του υλικού μπορεί να είναι 6-6,8 ή περισσότερο αλκαλικό όταν περιέχει μεγαλύτερη ποσότητα Mg²⁺. Ο βερμικουλίτης έχει σχετικά μεγάλη εναλλακτική ικανότητα κατιόντων 100-150 meq/100gr. Δεν απορροφά Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ μπορεί όμως να απορροφήσει PO₄³⁻.

Κοκκόχωμα (Cocosoil)

Ο φλοιός που χρησιμοποιείται ως υπόστρωμα στην υδροπονία προέρχεται από το φλοιό των καρπών του κοκκοφοίνικα (ινδική καρύδα). Είναι ελαφρύ σκουρόχρωμο υλικό με ινώδη μορφή και περιέχει μεγάλη ποσότητα άνθρακα (50%) και μικρή αζώτου (0,1%). Είναι πλούσιο σε οργανική ουσία και παρουσιάζει πολύ καλή συμπεριφορά τόσο όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες (συγκρατεί ποσότητα νερού 6πλάσια του όγκου του) όσο και τη θρέψη των φυτών. Παρουσιάζει ΙΑΚ που κυμαίνεται μεταξύ 32-95 meq/100gr και ολικό πορώδες 86-94% (Noguera κ ά, 2000; Evans κ ά, 1996).

1.2.2 Αδρανή υποστρώματα

Τα αδρανή υποστρώματα παρουσιάζουν μηδενική ή ελάχιστη ΙΑΚ με αποτέλεσμα να καθίσταται ευκολότερος ο έλεγχος του θρεπτικού διαλύματος και να ευνοείται η κατάρτιση ενός σταθερού προγράμματος λίπανσης.

Περλίτης

Ο περλίτης είναι αργιλλοπυριτικό υλικό, ηφαιστειογενούς προέλευσης. Στην υδροπονία χρησιμοποιούνται διογκωμένοι κόκκοι διαμέτρου 1,5-5 mm. Η πυκνότητά του είναι 128 Kgr m⁻³ και μπορεί να συγκρατήσει 3πλάσια ως 4πλάσια ποσότητα νερού σε σχέση με τον όγκο του. Το νερό συγκρατείται κυρίως στους μικρούς πόρους στο εσωτερικό των κόκκων, ενώ στους μεγαλύτερους που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων παραμένει αέρας και μετά τη διαβροχή του υλικού. Το ΡΗ του υλικού είναι 7,0-7,5. Δεν έχει σημαντική ρυθμιστική και εναλλακτική ικανότητα και δεν περιέχει άλατα. Έχει χημική αδράνεια, σταθερή δομή, πορώδες 95-97% και είναι αποστειρωμένο υλικό. Σημαντικό πλεονέκτημα για τον Έλληνα παραγωγό αποτελεί το γεγονός ότι ο περλίτης είναι εγχώριο προϊόν.

Πετροβάμβακας

Ο πετροβάμβακας είναι το πλέον διαδεδομένο υπόστρωμα υδροπονικών καλλιεργειών. Η χρήση του ως υπόστρωμα σε διάφορες μορφές ξεκίνησε το 1969 στη Δανία (Smith, 1987) ενώ γρήγορα επεκτάθηκε και σε άλλες χώρες όπως στην Ολλανδία και στις Σκανδιναβικές χώρες (Verwer και Welleman, 1980) κατακτώντας κυρίαρχη θέση.

Είναι διογκωμένο, ινώδες, ανόργανο υλικό και οι πρώτες ύλες από τις οποίες παρασκευάζεται, με θερμική επεξεργασία στους 1600 °C, είναι βασάλτης, ασβεστόλιθος και γαιάνθρακας, σε αναλογία 4:1:1. Το pH του υλικού είναι 7-9,5 (Smith, 1987), η πυκνότητά του 75 Kgr m⁻³, ενώ δεν παρουσιάζει σημαντική ΙΑΚ. Το πορώδες του υλικού είναι 95-97% και είναι αποστειρωμένο υλικό. Ο πετροβάμβακας περιέχει ορισμένα άλατα που σε μικρή ποσότητα μπορούν να αποσπαστούν από τα φυτά. Είναι εισαγόμενο προϊόν. Για γεωργική χρήση ο πετροβάμβακας διατίθεται τόσο σε μορφή κύβων (για προβλάστηση και

παραγωγή πολλαπλασιαστικού υλικού) όσο και σε μορφή ορθογωνίων πλακών με διαστάσεις ανάλογες με το είδος του φυτού που πρόκειται να καλλιεργηθεί.

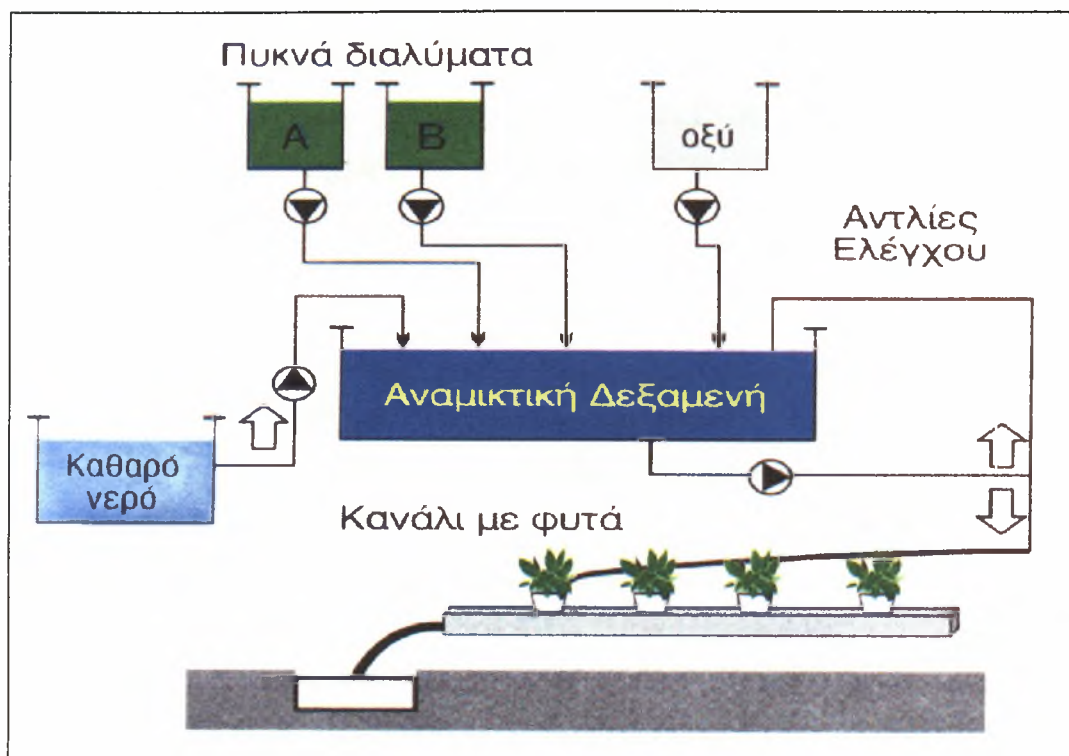
1.3 Διάκριση Υδροπονικών συστημάτων ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος

Ανεξαρτήτως της χρήσης ή μη υποστρώματος, γίνεται διάκριση μεταξύ δυο βασικών συστημάτων υδροπονικών καλλιεργειών, του **ανοιχτού** και του **κλειστού** υδροπονικού συστήματος, ανάλογα με τη διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος. Το καθ' ένα από αυτά τα συστήματα έχει σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, σε επίπεδο εφαρμογής, εξοπλισμού και ελέγχου.

1.3.1 Ανοιχτό υδροπονικό σύστημα

Στα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα το θρεπτικό διάλυμα που χρησιμοποιείται για την λίπανση της καλλιέργειας παρασκευάζεται πριν την έναρξη της άρδευσης, έχει σταθερή χημική σύσταση και απορρίπτεται μετά το τέλος αυτής (Εικόνα 1). Τα επίπεδα των θρεπτικών στοιχείων στην περιοχή της ριζόσφαιρας παραμένουν σχεδόν σταθερά λόγω της συχνής άρδευσης (συχνή, διακοπτόμενη και μικρής διάρκειας), με αποτέλεσμα να μην είναι αναγκαία η συχνή ρύθμιση και τροποποίηση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος. Αυτό απλουστεύει την διαχείριση του συστήματος, επιβαρύνει όμως οικονομικά τον παραγωγό και οικολογικά το περιβάλλον με την αποβολή μεγάλου όγκου λιπασμάτων και νερού που απομακρύνεται μετά την πραγματοποίηση της άρδευσης.

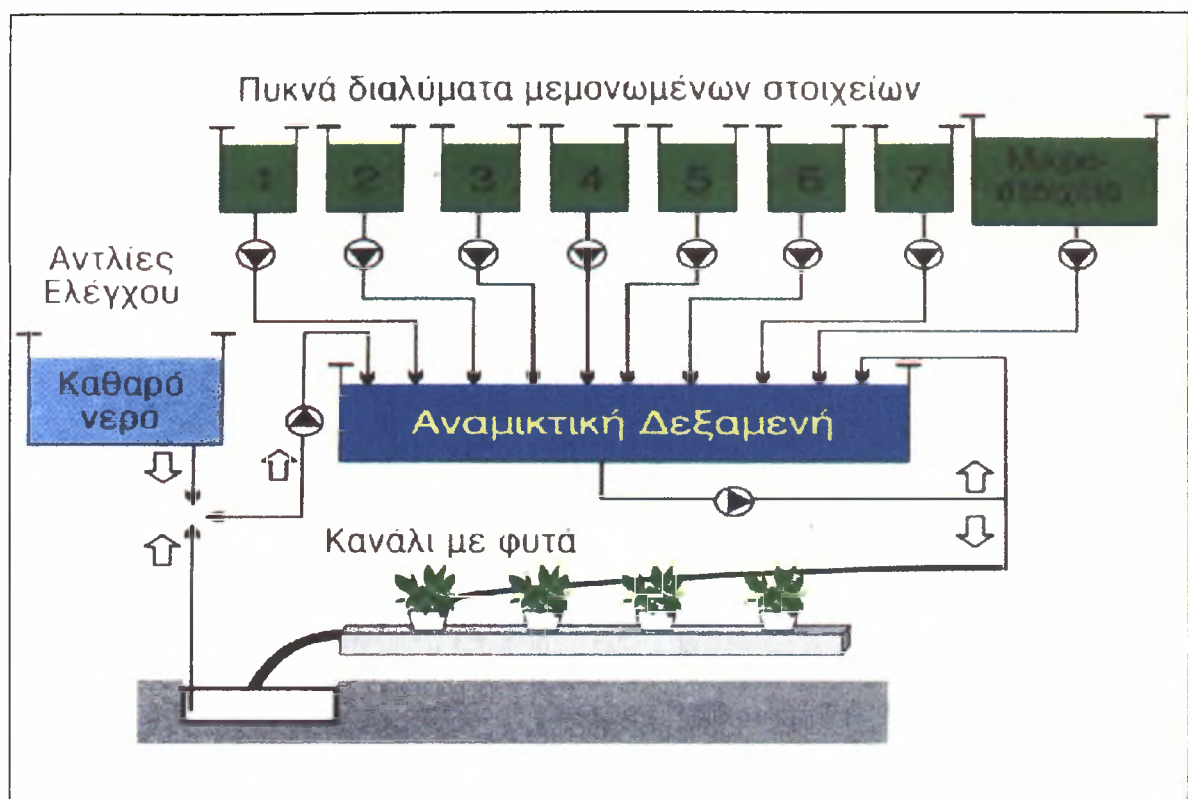
Τα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα άρχισαν να χρησιμοποιούνται στα τέλη της δεκαετίας του '70. Η εφαρμογή τους σε εμπορική κλίμακα στις θερμοκηπιακές καλλιέργειες, άρχισε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80. Ο κύριος λόγος της στροφής προς τα συστήματα αυτά ήταν η ανακάλυψη σημαντικών ποσοτήτων βρωμιούχου μεθυλίου σε γεωτρήσεις πόσιμου νερού. Έτσι τα συστήματα αυτά θεωρήθηκαν ως λύση στο πρόβλημα της χρήσης χημικών για την απολύμανση των εδαφών και κατά συνέπεια της μόλυνσης των υπογείων υδάτων (Van Os, 1999).



Εικόνα 1. Ανοιχτό υδροπονικό σύστημα

1.3.2 Κλειστό υδροπονικό σύστημα

Στο κλειστό υδροπονικό σύστημα το πλεονάζον θρεπτικό διάλυμα απομακρύνεται από το χώρο των ριζών, συλλέγεται, διορθώνεται και επαναχρησιμοποιείται για την άρδευση της καλλιέργειας (Εικόνα 2). Ένας τρόπος επαναχρησιμοποίησης του διαλύματος απορροής είναι η συνεχής επανακυκλοφορία του θρεπτικού διαλύματος (π.χ. NFT). Ο δεύτερος τρόπος επαναχρησιμοποίησης αφορά υδροπονικά συστήματα στα οποία η παροχή θρεπτικού διαλύματος είναι συχνή αλλά διακοπτόμενη και μικρής διάρκειας. Σε αυτού του είδους τα κλειστά υδροπονικά συστήματα, τα φυτά καλλιεργούνται σε σάκους ή σε φυτοδοχεία.



Εικόνα 2. Κλειστό υδροπονικό σύστημα

Σε ένα κλειστό υδροπονικό σύστημα η συγκέντρωση του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει, γίνεται είτε στην ίδια δεξαμενή που χρησιμοποιείται για την άρδευση της καλλιέργειας, οπότε το απορρέον θρεπτικό διάλυμα αναμειγνύεται με το υπάρχον αρχικό, είτε σε ξεχωριστή δεξαμενή οπότε χρησιμοποιείται αυτούσιο μετά την εκκένωση της πρώτης δεξαμενής.

Συνηθέστερη μέθοδος που επιδέχεται, μέχρι ένα βαθμό την αυτοματοποίηση του συστήματος, είναι η συγκέντρωση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος σε ξεχωριστή δεξαμενή. Οι στρατηγικές που μπορούν να εφαρμοστούν για τη διόρθωση του διαλύματος απορροής με προσθήκη της αναγκαίας ποσότητας νερού και θρεπτικών στοιχείων (και με την παραδοχή ότι οι αλλοιώσεις που έχει υποστεί το απορρέον θρεπτικό διάλυμα που επαναχρησιμοποιείται δεν είναι ικανές να μεταβάλουν σημαντικά τις ιδιότητες του νέου θρεπτικού διαλύματος που θα προκύψει μετά τη διόρθωση) εξαρτώνται από το διατιθέμενο εξοπλισμό και μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες (Savvas, 2002):

1. Συμπλήρωση με προεπιλεγόμενη αναλογία μείξης απορρέοντος διαλύματος- νερού
2. Συμπλήρωση με ρυθμιζόμενη αναλογία μείξης απορρέοντος διαλύματος- νερού
3. Συμπλήρωση με αυτόματα μεταβαλλόμενη αναλογία έγχυσης λιπασμάτων

Ο βαθμός επαναχρησιμοποίησης του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος εξαρτάται από το βαθμό της μεταβολής που έχει υποστεί το θρεπτικό διάλυμα κατά τη διάρκεια της χρήσης του. Η μεταβολή αυτή εκφράζεται μέσω της μεταβολής του PH και της EC του θρεπτικού διαλύματος.

1.3.2.1 Αναγκαιότητα του κλειστού υδροπονικού συστήματος

Την τελευταία δεκαετία υπήρξε σημαντική στροφή προς τα κλειστά συστήματα, κυρίως λόγω της ευαισθητοποίησης για την προστασία του περιβάλλοντος. Σε πολλές χώρες της Βόρειας Ευρώπης (Ολλανδία), η ανάπτυξη των κλειστών υδροπονικών συστημάτων υποστηρίζεται από τους αρμόδιους κρατικούς φορείς με διάφορα κίνητρα αλλά και νομοθετικές ρυθμίσεις, με στόχο την μείωση της επιβάρυνσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και των επιφανειακών νερών, με νιτρικά και φωσφορικά ιόντα καθώς και υπολείμματα φυτοφαρμάκων. Στην Ολλανδία τα μνημόνια συνεργασίας που έγιναν στα τέλη της δεκαετίας του '80, μεταξύ των παραγωγών και κρατικών φορέων, προέβλεπαν την εξολοκλήρου χρήση των κλειστών υδροπονικών συστημάτων για την καλλιέργεια θερμοκηπιακών προϊόντων εκτός εδάφους μέχρι το έτος 2000 (National Environmental Policy Plan, 1989; Agricultural Structure Memorandum, 1989; Multi-Year Crop Protection Plan, 1991). Το ίδιο συνέβη και σε άλλες χώρες (Μεγάλη Βρετανία, Γερμανία) με απώτερο στόχο να εξασφαλιστεί η αειφορία, η δυναμικότητα και η ανταγωνιστικότητα του τομέα των θερμοκηπιακών καλλιεργειών

Με την επαναχρησιμοποίηση του θρεπτικού διαλύματος εξοικονομείται σημαντική ποσότητα λιπασμάτων και νερού, ενώ επιβαρύνεται λιγότερο το περιβάλλον με χημικά απόβλητα (Van Os, 1999). Μελέτες έδειξαν ότι η εξοικονόμηση νερού και λιπασμάτων μπορεί να είναι πάνω από 30% και 40 %,

αντίστοιχα, σε σχέση με τα ανοικτά υδροπονικά συστήματα (Ruijs και Van Os, 1991; Van Os κ ά, 1991; Ruijs, 1994).

1.3.2.2 Προβλήματα εφαρμογής των κλειστών υδροπονικών συστημάτων

Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει από το περιβάλλον της ρίζας διαφέρει από αυτήν του διαλύματος που εφαρμόζεται στην καλλιέργεια (Sonneveld, 1981; Ravin κ ά, 1998). Το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC), η συγκέντρωση και αναλογία των θρεπτικών στοιχείων, είναι δυνατό να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια της χρήσης του θρεπτικού διαλύματος σε μια κλειστή υδροπονική καλλιέργεια. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η δυσκολία διαχείρισης του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος.

Ο κίνδυνος της εύκολης εξάπλωσης παθογόνων μικροοργανισμών, μέσω του ανακυκλούμενου θρεπτικού διαλύματος (Amsing, 1995; Bowe και Reinelt, 1991; Davis, 1981; McPherson κ ά, 1995), αποτελεί ένα επιπλέον σημαντικό πρόβλημα των κλειστών συστημάτων. Στην πράξη βέβαια ο κίνδυνος αυτός περιορίζεται σημαντικά λόγω της αποστείρωσης των υποστρωμάτων πριν την έναρξη της καλλιέργειας, καθώς και με τη χρήση συστημάτων απολύμανσης του θρεπτικού διαλύματος. Από την πρακτική εμπειρία όσο και από σχετικά πειράματα έχει αποδειχθεί ότι ακόμη και αν μολυνθούν κάποια φυτά, η υπόλοιπη καλλιέργεια συνήθως δεν μολύνεται εφόσον αυτά απομακρυνθούν άμεσα. Παρ' όλα αυτά, ο κίνδυνος εξάπλωσης ασθενειών δεν θα πρέπει να αγνοείται και γι' αυτό στις περιπτώσεις των κλειστών υδροπονικών συστημάτων το απορρέον θρεπτικό διάλυμα κρίνεται σκόπιμο να απολυμαίνεται πριν την επαναχρησιμοποίησή του. Οι μέθοδοι απολύμανσης που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι (Wohanka, 2002):

- Με χρήση όζοντος
- Με χρήση φίλτρων άμμου (ή βιοφίλτρων)
- Με χρήση Υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας
- Με παστερίωση

Ένας άλλος παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαχείριση του θρεπτικού διαλύματος στα κλειστά υδροπονικά συστήματα είναι τα χαρακτηριστικά (υδρολογικά και χημικά) του υποστρώματος που χρησιμοποιείται (Verdonck κ ά, 1981). Τα χαρακτηριστικά αυτά του υποστρώματος μπορούν να

μεταβάλουν την ποσότητα και την ποιότητα του θρεπτικού διαλύματος που θα επιστρέψει κατά την ανακύκλωση (Lemaire 1995; Fakhri *et al* 1995). Εντελώς αδρανή υποστρώματα όπως ο περλίτης και η ελαφρόπετρα, επηρεάζουν τον όγκο του διαλύματος που θα επιστρέψει κατά την ανακύκλωσή του, όχι όμως την χημική του σύσταση, πέρα από το βαθμό που αυτή έχει αλλοιωθεί από την δράση των φυτών (Orozco *et al* 1995). Αντίθετα, υποστρώματα όπως η τύρφη, ο φλοιός κόκκου, η άμμος και πιθανώς ο πετροβάμβακας, είναι σε θέση να μεταβάλουν, όχι μόνο τον όγκο του θρεπτικού διαλύματος που θα επιστρέψει κατά την ανακύκλωση, αλλά και την χημική του σύσταση (ανάλογα με το χρόνο χρήσης του υλικού), επιπρόσθετα από ότι αυτή έχει μεταβληθεί από την δράση των φυτών (Rupp *et al* 1989; Wilson 1985).

Ένα σημαντικό πρόβλημα των κλειστών υδροπονικών συστημάτων είναι η συσσώρευση ανεπιθύμητων ιόντων (Na^+ , Cl^-) ή ακόμα και θρεπτικών στοιχείων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) σε υψηλές συγκεντρώσεις στην περιοχή της ριζόσφαιρας (Attenburrow και Waller, 1980; Ravin κ ά, 1998; Urrestarazu και Garcia, 2000). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας σε επίπεδα μη επιτρεπτά για την ανάπτυξη και αύξηση των φυτών. Στις περιπτώσεις αυτές, προκειμένου να αποφευχθεί αύξηση της αλατότητας, κρίνεται απαραίτητη η απόρριψη του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος. (Bar-Yosef κ ά, 2001α, 2001β). Σημαντικό ρόλο παίζει η ποιότητα του νερού άρδευσης και συγκεκριμένα οι συγκεντρώσεις του Na^+ και του Cl^- σε αυτό.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα τελευταία χρόνια επιχειρείται ή και επιβάλλεται ακόμα, μια αλλαγή κατεύθυνσης προς τα κλειστά υδροπονικά συστήματα, κυρίως λόγω προστασίας του περιβάλλοντος. Σε κάθε περίπτωση, στην αλλαγή αυτή της τάσης συνεπικουρεί και το γεγονός ότι η καλλιέργεια των φυτών σε κλειστά υδροπονικά συστήματα δεν παρουσιάζει προβλήματα, όσον αφορά την ποιότητα και ποσότητα των παραγόμενων προϊόντων, σε σχέση με τα ανοικτά υδροπονικά συστήματα. Πειράματα σε καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, έδειξαν ότι η επαναχρησιμοποίηση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος, δεν επηρέασε αρνητικά την ποιότητα και την ποσότητα των δρεπτικών ανθέων (Ravin κ ά, 1998). Παρόμοια αποτελέσματα αναφέρουν ο Zekki κ. ά. (1996) και ο Bar-Yosef κ. ά. (2001α) σε καλλιέργεια τομάτας και πιπεριάς, αντίστοιχα.

1.4 Μέθοδοι υδροπονικών καλλιεργειών

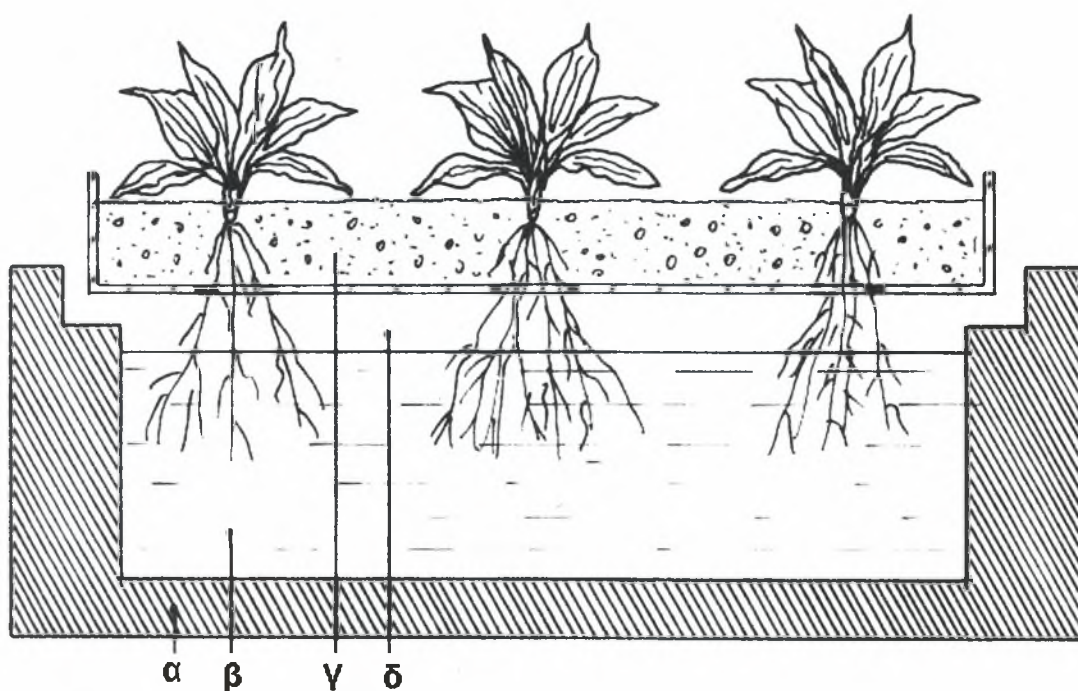
Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η εφαρμογή του θρεπτικού διαλύματος στην καλλιέργεια, ανεξάρτητα το σύστημα που ακολουθείται (ανοιχτό ή κλειστό) χαρακτηρίζεται ως μέθοδος υδροπονικής καλλιέργειας. Μια διάκριση που γίνεται μεταξύ των μεθόδων, αφορά τη χρήση ή μη υποστρώματος.

1.4.1 Μέθοδοι χωρίς τη χρήση υποστρώματος

Από τη φύση τους, οι μέθοδοι στις οποίες δεν χρησιμοποιείται υπόστρωμα για τη στήριξη των φυτών (υδροκαλλιέργεια), είναι κλειστά συστήματα στα οποία οι ρίζες των φυτών έρχονται απ' ευθείας σε επαφή με το θρεπτικό διάλυμα. Στην κατηγορία αυτή υπάγονται διάφορες μέθοδοι, όπως: η μέθοδος Deep Flow Technique, η μέθοδος NFT και η Αεροπονία.

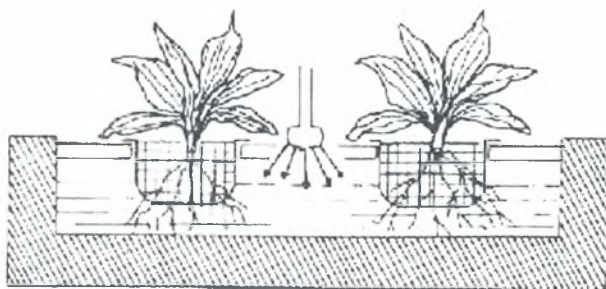
1.4.1.1 Μέθοδος Deep Flow Technique

Στη μέθοδο αυτή (Εικόνα 3) τα φυτά στηρίζονται πάνω από την επιφάνεια του θρεπτικού διαλύματος σε επιπλέοντα τμήματα από ελαφρύ πλαστικό (πολυστυρένιο). Τα τμήματα αυτά στηρίζονται πάνω σε τσιμεντένιες δεξαμενές με διαστάσεις 4m πλάτος x 70m μήκος x 30cm βάθος. Η καλλιέργεια τροφοδοτείται συνεχώς με θρεπτικό διάλυμα μέσω αντλίας, ενώ η οξυγόνωση του διαλύματος επιτυγχάνεται με πτώση του από τη δεξαμενή συλλογής στη δεξαμενή μείξης πριν την επαναχρησιμοποίηση. Η συνεχής απομάκρυνση του θρεπτικού διαλύματος από το ριζικό σύστημα επιτυγχάνεται με τη βαρύτητα, για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η πρόβλεψη σωστής κλίσης του δαπέδου (2-3%).

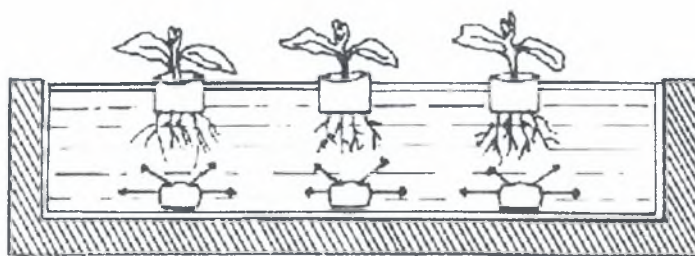


Εικόνα 3. Μέθοδος DFT. α: Ενισχυμένες τσιμεντένιες δεξαμενές, β: Θρεπτικό διάλυμα, γ: Ελαφριά πλαστικά στηρίγματα, δ: στρώμα αέρα για αερισμό ριζών

Παραλλαγές της μεθόδου αυτής είναι οι μέθοδοι “Kyowa” και “M” (Εικόνες 4 και 5). Στη μέθοδο “Kyowa” τα φυτά στηρίζονται σε καλάθια, το ριζικό σύστημα είναι εμβαπτισμένο στο θρεπτικό διάλυμα και οι δεξαμενές είναι κατασκευασμένες από σκληρό πλαστικό. Το θρεπτικό διάλυμα παρέχεται στα φυτά μέσω αντλίας από το πάνω μέρος των δεξαμενών, η οποία το εκτοξεύει με πίεση ούτως ώστε να καθίσταται ικανή η οξυγόνωση του . Η απορροή του διαλύματος γίνεται μέσω σωλήνων υπερχείλισης. Η μέθοδος “M” προσομοιάζει την προηγούμενη, με τη μόνη διαφορά ότι η παροχή του θρεπτικού διαλύματος δίδεται από το κάτω μέρος των δεξαμενών.



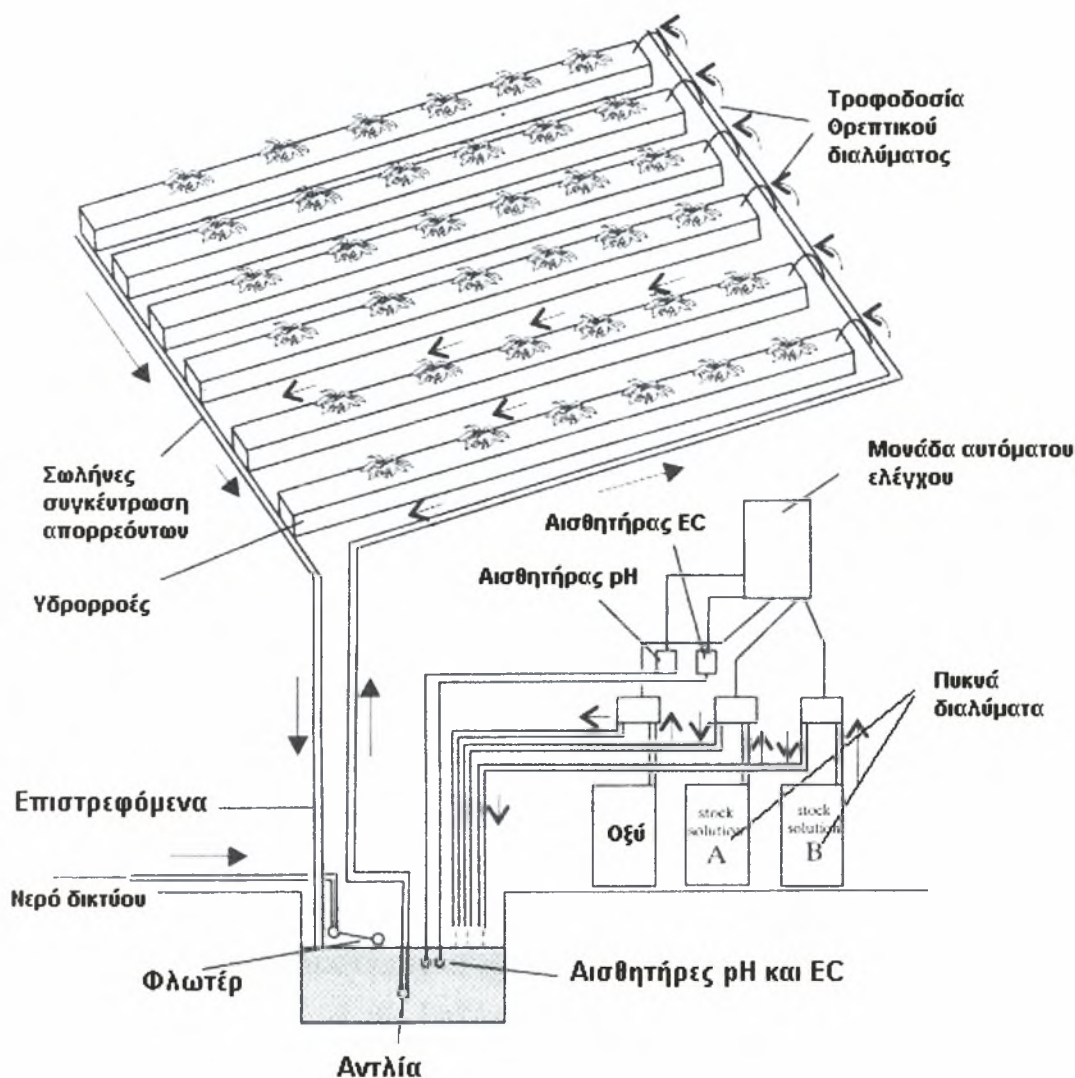
Εικόνα 4. Μέθοδος “Kyowa”



Εικόνα 5. Μέθοδος "Μ"

1.4.1.2 Nutrient Film Technique

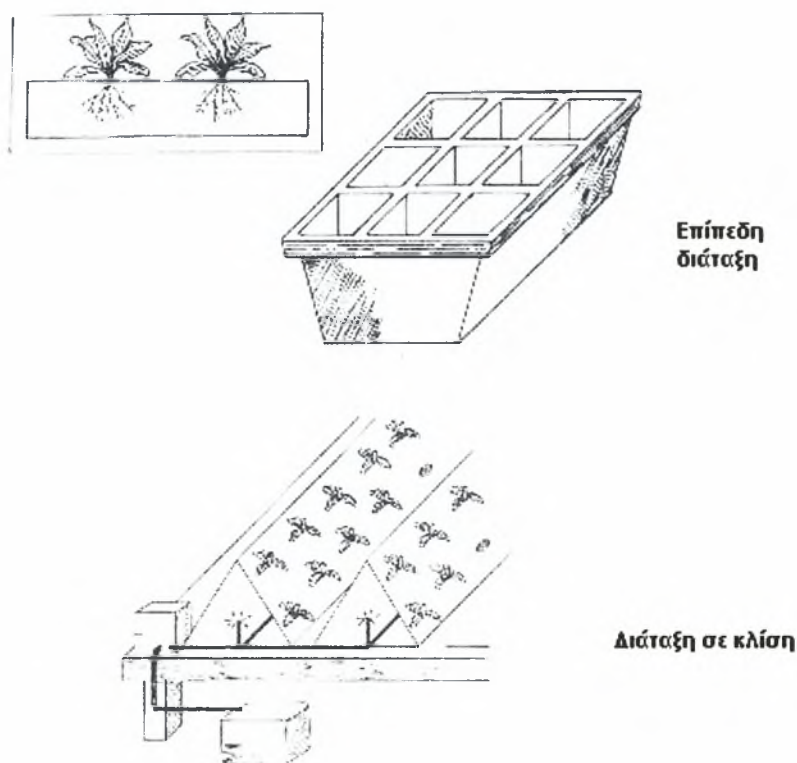
Στη μέθοδο NFT (Τεχνική λεπτής θρεπτικής στοιβάδας), ένα πολύ λεπτό στρώμα θρεπτικού διαλύματος έρχεται σε συνεχή επαφή με το ριζικό σύστημα (Εικόνα 6). Το θρεπτικό διάλυμα ανακυκλώνεται συνεχώς, επιτρέποντας την έκθεση των ριζών στον αέρα. Μια εγκατάσταση NFT αποτελείται από ένα σύστημα παράλληλα τοποθετημένων υδρορροών (καναλιών) κατασκευασμένων από PE ή PVC και πλάτους 15-30 cm, μέσα στις οποίες ρέει θρεπτικό διάλυμα με ρυθμό περίπου $2-3 \text{ L h}^{-1}$. Μέσα σε κάθε υδρορροή τοποθετούνται φυτά σε καθορισμένες αποστάσεις μεταξύ τους. Η μέθοδος αυτή δίνει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης του ελέγχου του θρεπτικού διαλύματος, διευκολύνει την ομοιομορφία παροχής των θρεπτικών στα φυτά, ενώ ταυτόχρονα απλοποιεί τη διαδικασία της άρδευσης. Μειονεκτήματα της μεθόδου αποτελούν το μεγάλο αρχικό κόστος εγκατάστασης και η προαπαιτούμενες εξειδικευμένες γνώσεις θρέψης και διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος από τον παραγωγό.



Εικόνα 6. Μέθοδος λεπτής θρεπτικής στοιβάδας (NFT)

1.4.1.3 Αεροπονία

Η αεροπονία είναι μια παραλλαγή της υδροπονίας στην οποία επίσης δεν γίνεται χρήση στερεού υποστρώματος. Στις αεροπονικές μεθόδους (Εικόνα 7) καλλιέργειας το θρεπτικό διάλυμα ψεκάζεται με ακροφύσια πάνω στο αναπτυσσόμενο, μέσα σε κενά κιβώτια ή φυτοδοχεία (επίπεδα ή σε μικρή κλίση), ριζικό σύστημα έτσι ώστε ο χώρος να είναι συνεχώς κορεσμένος με υγρασία (Steiner, 1976). Κατ' αυτόν τον τρόπο η ρίζα παραμένει συνεχώς υγρή, αερίζεται και μπορεί να απορροφά νερό και θρεπτικά στοιχεία. Εφαρμόζεται κυρίως για την υποκίνηση ανάπτυξης του ριζικού συστήματος των μοσχευμάτων.

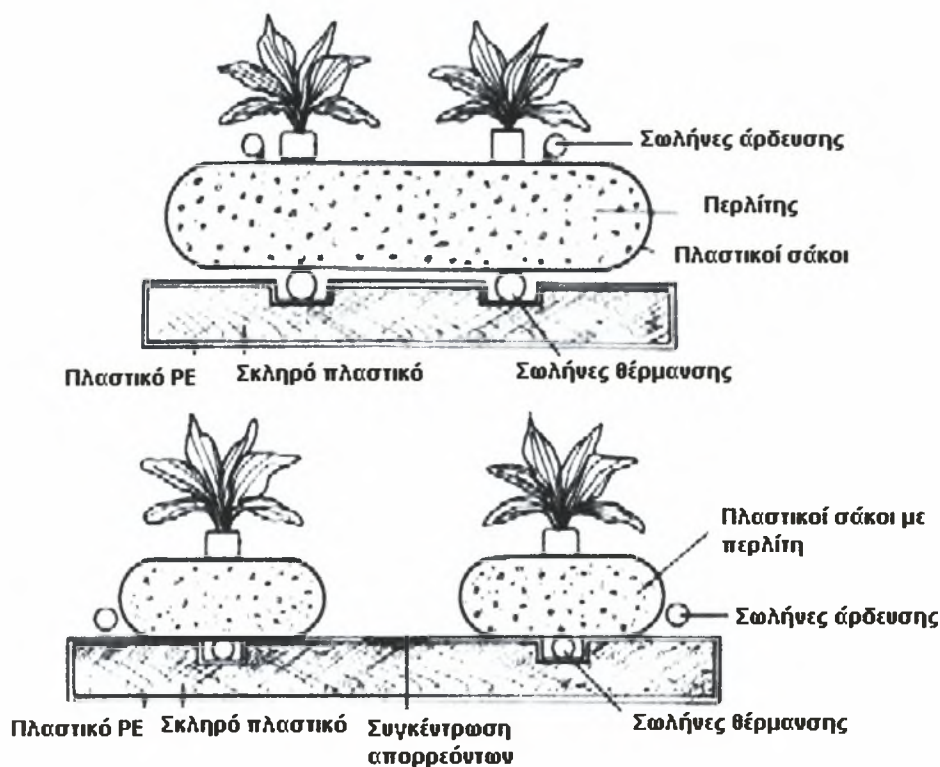


Εικόνα 7. Σχηματική απεικόνιση αεροπονικών μεθόδων

1.4.2 Μέθοδοι βασιζόμενες στη χρήση υποστρώματος

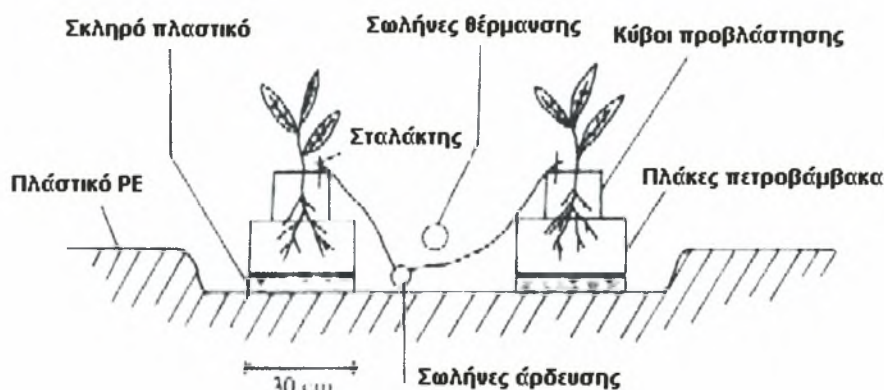
Στα συστήματα αυτά, χρησιμοποιούνται στερεά υποστρώματα, αδρανή ή χημικώς ενεργά. Η τροφοδοσία του θρεπτικού διαλύματος γίνεται μέσω σταλακτών (στάγδην άρδευση), ενώ η συχνότητα άρδευσης εξαρτάται από το στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας και από το είδος των φυτών. Τα κυριότερα υποστρώματα που χρησιμοποιούνται είναι ο πετrobάμβακας και ο περλίτης.

Όσον αφορά τον περλίτη, η συνήθης πρακτική είναι η καλλιέργεια φυτών σε σάκους, με διαστάσεις 1-1,2 m μήκος και 30 cm διάμετρο (Μαλούρα κ ά, 1999). Οι σάκοι διαθέτουν οπές στο επάνω μέρος για την τοποθέτηση φυτών και ανοίγματα στο κάτω μέρος για την απορροή του θρεπτικού διαλύματος. Οι σάκοι τοποθετούνται σε διπλές γραμμές στο χώρο του θερμοκηπίου, ενώ κάτω από τους σάκους τοποθετείται σκληρό πλαστικό, με επικάλυψη από PE, για τη συλλογή των απορρεόντων με κλίση 0,5% (Εικόνα 8).

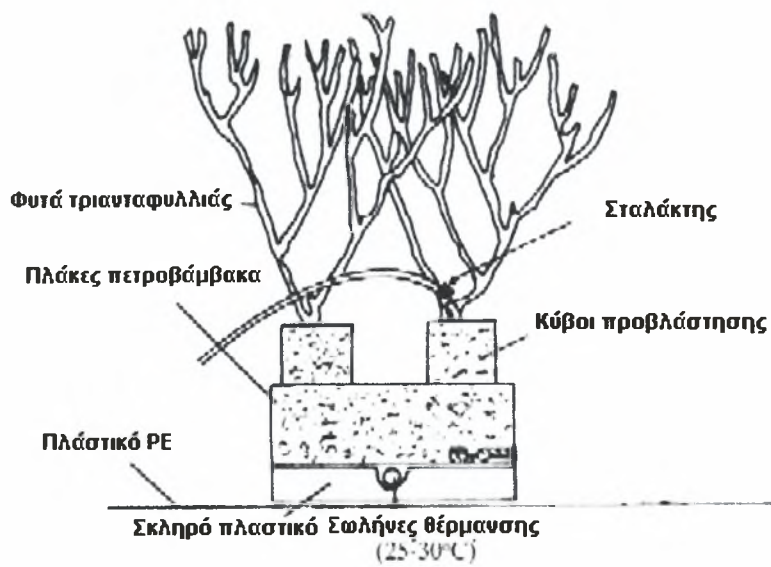


Εικόνα 8. Γενικό σχέδιο καλλιέργειας σε σάκους περλίτη (Μαλούρα κ ά,1999)

Όσον αφορά τον πετροβάμβακα, χρησιμοποιούνται ορθογώνιες πλάκες επικαλυμμένες με άσπρου χρώματος PE και διαστάσεων 0,9-1 m μήκος, 15-30 cm πλάτος και 7,5 cm ύψος, που φέρουν οπές στο επάνω μέρος για την τοποθέτηση των φυτών. Τα φυτά τοποθετούνται στις οπές, αφού έχουν αναπτυχθεί πρώτα σε κύβους προβλάστησης πετροβάμβακα. Κάτω από τις πλάκες τοποθετείται σκληρό πλαστικό, με επικάλυψη από PE, για τη συλλογή των απορρεόντων με κλίση 0,3%. Υπάρχουν διάφορα σχήματα χωροδιάταξης των πλακών, μερικά από τα οποία απεικονίζονται στις Εικόνες 9α και 9β.



Εικόνα 9α. Διάταξη καλλιέργειας τομάτας σε πετροβάμβακα



Εικόνα 9β. Διάταξη καλλιέργειας τριανταφυλλιάς σε πετροβάμβακα (από Van der Ende και Breuring, 1983)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο. – ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΘΡΕΠΤΙΚΟΥ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ

2.1 Γενικά

Θρεπτικό διάλυμα στην υδροπονία καλούμε το υδατικό διάλυμα που περιέχει με τη μορφή ιόντων όλα εκείνα τα θρεπτικά στοιχεία, που είναι απαραίτητα για τη σωστή θρέψη των φυτών.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο οι κύριες διαφορές των υδροπονικών συστημάτων από τη συμβατική καλλιέργεια στο έδαφος, είναι ο πολύ μικρός διαθέσιμος όγκος ριζοστρώματος που εκμεταλλεύεται το φυτό και η μηδενική ή πολύ μικρή εναλλακτική ικανότητα των υποστρωμάτων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι διαθέσιμες ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων στην καλλιέργεια να είναι αρκετά περιορισμένες και να καλύπτουν μικρό μόνο μέρος των απαιτήσεων των φυτών (Sonneveld, 1995). Για το λόγο αυτό απαιτείται συνεχής παροχή θρεπτικού διαλύματος, η σύνθεση του οποίου πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες της καλλιέργειας. Στις υδροπονικές καλλιέργειες (εκτός αυτών στις οποίες χρησιμοποιούνται χημικώς ενεργά υποστρώματα), τα θρεπτικά στοιχεία παρέχονται στα φυτά από το θρεπτικό διάλυμα. Επομένως η επίτευξη υψηλής παραγωγής εξαρτάται άμεσα από τη διατήρηση των θρεπτικών στοιχείων στα βέλτιστα επίπεδα. Ζωτικής σημασίας στα υδροπονικά συστήματα αποτελεί ο συνεχής έλεγχος της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος, λόγω της έλλειψης ρυθμιστικής ικανότητας και του γρήγορου χρόνου απόκρισης του συστήματος στους λάθος χειρισμούς.

Είναι εμφανές ότι λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων της κάθε καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία, αλλά και της ίδιας καλλιέργειας στα διάφορα στάδια ανάπτυξης, των διαφορών που παρατηρούνται ανάμεσα σε ποικιλίες του ίδιου είδους αλλά και των επιδράσεων των κλιματικών παραμέτρων στη θρέψη των φυτών, δεν είναι δυνατόν να υφίσταται ένας μόνο τύπος θρεπτικού διαλύματος συγκεκριμένης σύνθεσης και ευρείας εφαρμογής. Τα πρώτα θρεπτικά διαλύματα ευρείας εφαρμογής ήταν τα τύπου Hoagland (Hoagland και Arnon, 1950), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για πειραματικούς σκοπούς. Άλλοι τύποι διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και χρησιμοποιούνται ακόμα με

τροποποιημένη σύνθεση είναι τα διαλύματα κατά Steiner (1968 και 1984). Αν και δεν υπάρχει ένα ευρείας χρήσης θρεπτικό διάλυμα, εντούτοις είναι γνωστή η σύνθεση την οποία θα πρέπει να έχει αυτό στην περιοχή της ριζόσφαιρας. Η σύνθεση των διαλυμάτων αυτών είναι τέτοια που να εξασφαλίζεται η σωστή και απρόσκοπτη ανάπτυξη των φυτών, χωρίς την παρατήρηση τοξικών συμπτωμάτων ή τροφοπενιών (Kipp κ ά, 1999) (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Σύνθεση θρεπτικών διαλυμάτων στην περιοχή της ρίζας για την ανάπτυξη φυτών σε υδροπονικά συστήματα

		Hoagland ^α	Hoagland ^β	Steiner	Kipp
Θρεπτικά Στοιχεία		mmol L ⁻¹			
Μακροστοιχεία	K	6	6	7,2	5
	Ca	4	4	4,5	4,5
	Mg	2	1	2	2,5
	N	15	16	11,9	12
	P	1	2	1	1
	S	2	1	3,45	3
Θρεπτικά Στοιχεία		μmol L ⁻¹			
Μικροστοιχεία	Fe	25-50	20	24	25
	Mn	9	2	11	5
	Zn	0,8	2	2	5
	B	46	25	40	30
	Cu	0,3	0,5	0,3	1
	Mo	0,5	0,5	0,5	0,5
	Cl	-	50	-	-

^α : Hoagland και Arnon, 1950
^β : Τροποποιημένο από Johnson κ ά,1957

2.2 Εξοπλισμός διαχείρισης θρεπτικού διαλύματος σε κλειστά υδροπονικά συστήματα

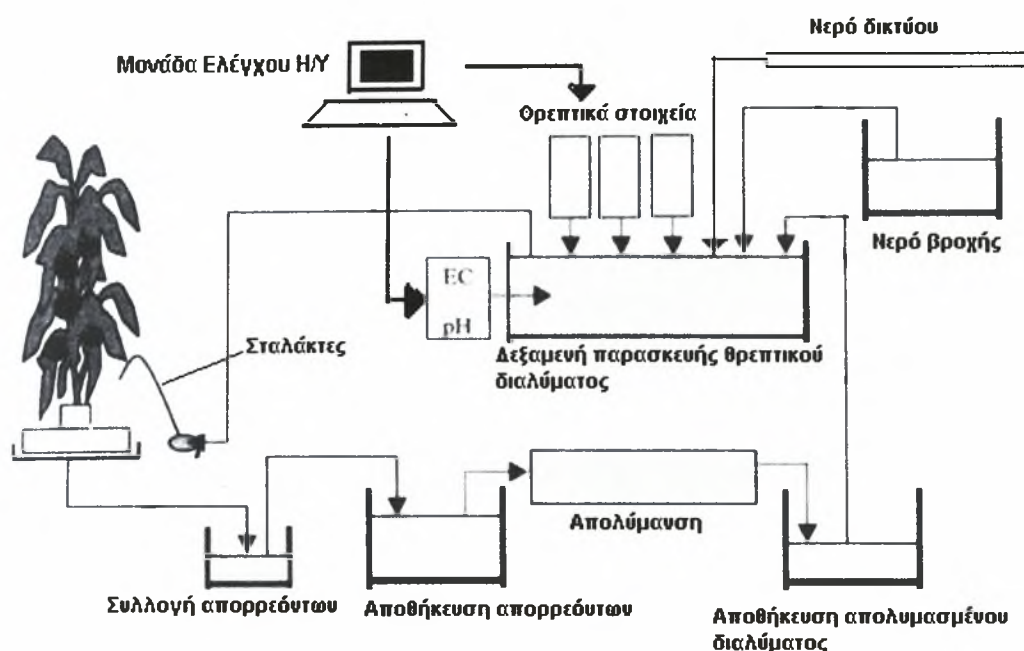
Για την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος στα κλειστά υδροπονικά συστήματα είναι απαραίτητη η χρήση επιπρόσθετου εξοπλισμού, ο οποίος αποτελείται από:

- Το σύστημα παρασκευής και ελέγχου του θρεπτικού διαλύματος
Αποτελείται συνήθως από ένα Η/Υ με ενσωματωμένο το κατάλληλο λογισμικό, μια σειρά δοσομετρικών αντλιών, έναν αισθητήρα μέτρησης του pH, έναν αισθητήρα μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), μια αντλία και μια σειρά δεξαμενών.

- Το σύστημα παροχής (τροφοδοσίας) του θρεπτικού διαλύματος στα φυτά
Αποτελείται από αντλίες, σειρά ηλεκτροβανών, τους αγωγούς διανομής και τους σταλάκτες (καλλιέργεια σε υπόστρωμα με στάγδην άρδευση)

- Το σύστημα παροχής του νερού δικτύου
- Το σύστημα απολύμανσης των απορρεόντων
- Το σύστημα συλλογής βρόχινου νερού

Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται μια γενική άποψη των μερών (υποσυστήματα) ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης.



Εικόνα 10. Σχηματική απεικόνιση μερών ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης, κλειστού υδροπονικού συστήματος

Στην πράξη υφίστανται δυο διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά στη διαχείριση νερού και θρεπτικών, πριν την εφαρμογή του θρεπτικού διαλύματος στα φυτά:

- Χρήση δεξαμενής ανάμιξης
- Απ' ευθείας έκχυση θρεπτικών, χωρίς ανάμιξη

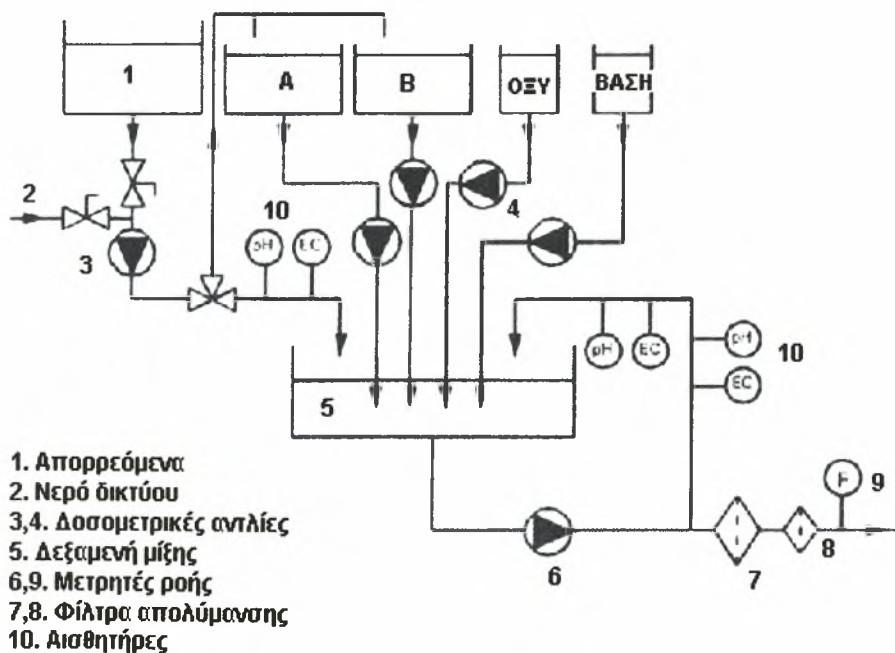
Ανεξάρτητα από τη χρήση ή όχι της δεξαμενής ανάμιξης, χρησιμοποιούνται επιπλέον δεξαμενές (συνήθως 2 έως 3-Σύστημα A/B) που περιέχουν θρεπτικά διαλύματα συγκεκριμένης σύνθεσης και υψηλής συγκέντρωσης (συνήθως 100 φορές μεγαλύτερη από την επιθυμητή). Μεγαλύτερος αριθμός δεξαμενών (σύστημα πολλαπλών δεξαμενών) που περιέχουν ένα μόνο λίπασμα σε υγρή μορφή αποτελεί την καλύτερη λύση για την εφαρμογή των κλειστών υδροπονικών συστημάτων.

2.2.1 Σύστημα A/B

Είναι το περισσότερο χρησιμοποιούμενο σύστημα σήμερα σε εμπορική κλίμακα. Αποτελείται από δυο δεξαμενές (A και B) στις οποίες υπάρχουν θρεπτικά διαλύματα όπως αυτά που περιγράφηκαν στην ενότητα 2.1, αλλά σε συγκεντρώσεις 100 φορές μεγαλύτερες από τις συνιστώμενες για εφαρμογή (του

τελικού διαλύματος που θα εφαρμοστεί στην καλλιέργεια). Κατ' αυτόν τον τρόπο μειώνεται ο απαιτούμενος όγκος των δεξαμενών για την συνεχή παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης το σύστημα διαθέτει και άλλες δυο δεξαμενές, που περιέχουν οξύ ή βάση για τον έλεγχο του pH. Σε κάθε μια από τις δεξαμενές τοποθετούνται τα θρεπτικά εκείνα στοιχεία που δεν σχηματίζουν εύκολα χημικές ενώσεις μεταξύ τους, για την αποφυγή ιζηματοποιήσεων ή/και σχηματισμό συμπλόκων εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων. Πιο συγκεκριμένα δεν τοποθετούνται στην ίδια δεξαμενή το Ca^{+2} με τα SO_4^{2-} και τα HPO_4^{2-} ή τα PO_4^{3-} . Για την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθούν είτε υδατοδιαλυτά λιπάσματα σε μορφή σκόνης, είτε λιπάσματα υγρής μορφής.

Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται δεξαμενή μίξης (Εικόνα 11), τότε συγκεντρώνονται σε αυτή οι απαραίτητες ποσότητες λιπασμάτων, νερού δικτύου καθώς και το απορρέον θρεπτικό διάλυμα.



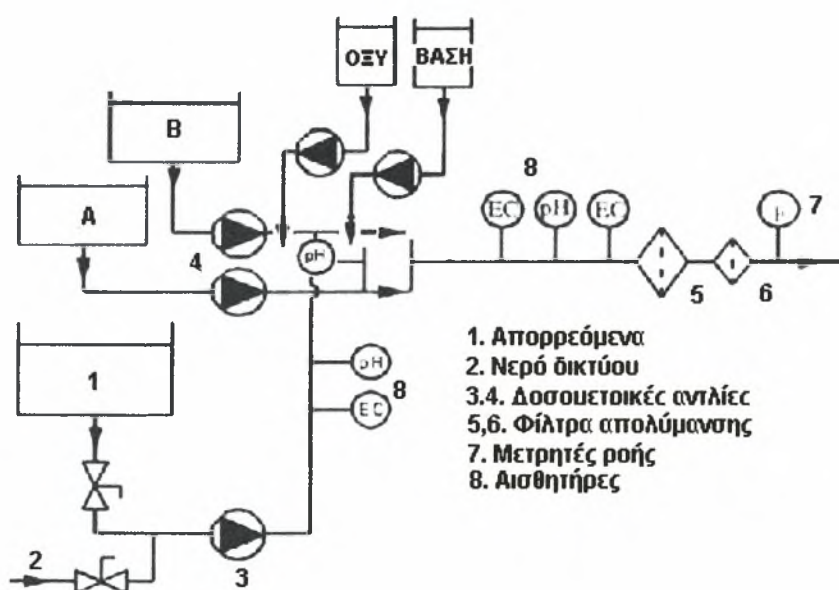
Εικόνα 11. Σχηματική απεικόνιση συστήματος A/B με χρήση δεξαμενής μίξης

Η έγχυση πυκνών διαλυμάτων και οξέως (ή βάσης) στη δεξαμενή ανάμιξης ελέγχεται από ηλεκτροβάνες, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με το σύστημα αυτόματου ελέγχου. Με τη λειτουργία των ηλεκτροβανών, οι δοσομετρικές αντλίες είναι σε θέση να αραιώνουν πυκνά διαλύματα λιπασμάτων με το νερό άρδευσης σε μια συγκεκριμένη, σταθερή χρονικά, αναλογία. Η αναλογία αραιώσης ποικίλλει

και συνήθως κυμαίνεται από 1:50 έως 1:1000. Στις περισσότερες δοσομετρικές αντλίες η αναλογία αραίωσης είναι ρυθμιζόμενη μέσα σε ένα ευρύ φάσμα αναλογιών, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να μπορεί να επιλέξει την αναλογία αραίωσης. Με τον τρόπο αυτό η τροφοδοσία των φυτών με θρεπτικά στοιχεία γίνεται ομοιόμορφα και ακριβέστερα.

Η δεξαμενή μίξης έχει το πλεονέκτημα ότι προσδίδει στο σύστημα τη δυνατότητα αποφυγής ανεπιθύμητων καταστάσεων (ιζηματοποίηση), λόγω ισχυρής και συνεχούς ανάδευσης, ενώ επηρεάζεται λιγότερο από απότομες μεταβολές της παροχής.

Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται δεξαμενή μίξης, γίνεται απ' ευθείας έγχυση των λιπασμάτων (από τις δεξαμενές A/B), των απορρεόντων και του νερού δικτύου, στις σωληνώσεις που κυκλοφορεί το θρεπτικό διάλυμα (Εικόνα 12).



Εικόνα 12. Σχηματική απεικόνιση συστήματος A/B με απ' ευθείας έγχυση

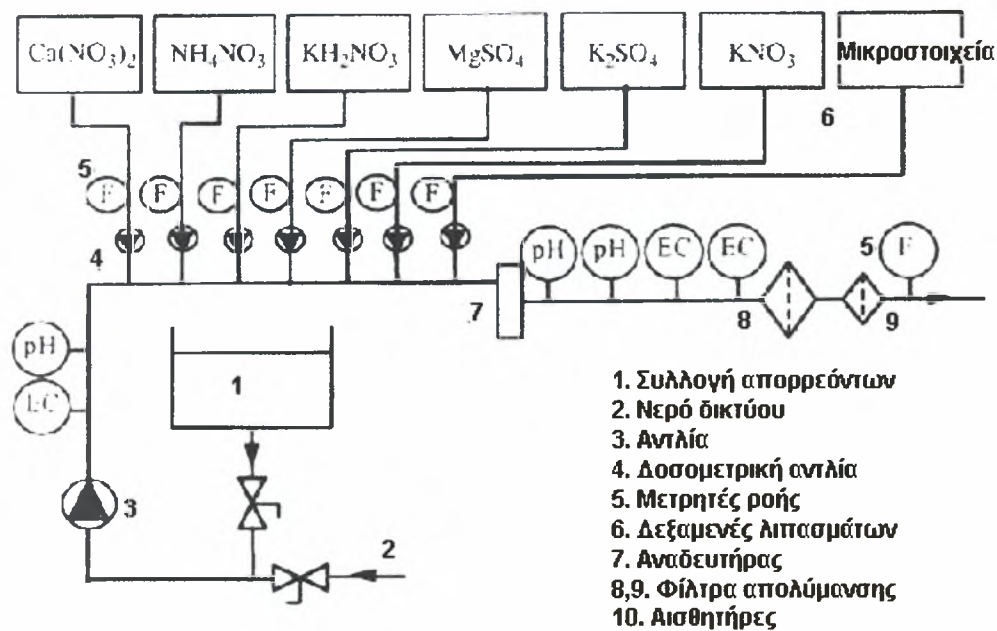
Η μίξη των επιμέρους στοιχείων λαμβάνει χώρα στον κύριο σωλήνα διανομής. Η απ' ευθείας έγχυση παρουσιάζει προβλήματα όσον αφορά την τροφοδοσία των θρεπτικών κυρίως για δυο λόγους:

- όταν μεταβάλλεται η παροχή μπορεί να παρατηρηθούν μεταβολές και στη σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος

- σε περίπτωση που γίνεται προσθήκη θρεπτικών χωρίς ισχυρή ανάδευση, παρατηρείται ιζηματοποίηση

2.2.2. Σύστημα πολλαπλών δεξαμενών

Στο σύστημα αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως 7 δεξαμενές που περιέχουν λιπάσματα σε υγρή μορφή, υψηλής καθαρότητας και υψηλής συγκέντρωσης. Τα λιπάσματα σε κάθε δεξαμενή αφορούν τις κύριες μορφές (ενώσεις) των θρεπτικών στοιχείων. Το κυριότερο πλεονέκτημα του συστήματος αυτού είναι η δυνατότητα πλήρους αυτοματοποίησης.



Εικόνα 13. Σχηματική απεικόνιση συστήματος πολλαπλών δεξαμενών

Για την προσθήκη των λιπασμάτων χρησιμοποιούνται υδραυλικές δοσομετρικές αντλίες (διαφραγματικές, εμβολοφόρες ή τύπου venturi). Η ποσότητα λιπάσματος που προστίθεται είναι ανάλογη της συχνότητας περιστροφής (στις εμβολοφόρες) ή τη συχνότητα παλμών (στις διαφραγματικές). Απαιτούνται πολύ προσεκτικοί χειρισμοί κυρίως λόγω της υψηλής συγκέντρωσης των λιπασμάτων. Το σύστημα αυτό μπορεί διαθέτει δεξαμενή μίξης ή να εφαρμόζεται απ' ευθείας έγχυση.

2.3. Δυσκολίες στη διαχείριση θρεπτικού διαλύματος

Είναι ευρέως γνωστό ότι η απορρόφηση των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά είναι επιλεκτική και εξαρτάται από τις απαιτήσεις της κάθε καλλιέργειας (στάδιο ανάπτυξης) και όχι τόσο από τις συγκεντρώσεις των θρεπτικών (Steiner, 1980; Morard και Benavides, 1990; Marschner, 1995; Le Bot κ ά, 1998). Πιο συγκεκριμένα η απορρόφηση του K^+ , P και των NO_3^- από τις ρίζες γίνεται με ενεργητικό τρόπο (Epstein κ ά, 1963; Forde και Clarkson, 1999). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τα φυτά να είναι σε θέση να απορροφήσουν K^+ , P και NO ακόμα και όταν οι συγκεντρώσεις τους είναι πολύ χαμηλές στην περιοχή της ριζόσφαιρας (Adams και Grimmett, 1986; Masey και Winsor, 1980α,β; Drew κ ά, 1984). Αντίθετα, η ενεργητική απορρόφηση των δισθενών μακροστοιχείων όπως των SO_4^{2-} δεν είναι τόσο αποδοτική (Schiff και Hodson, 1973; Cacco κ ά, 1977), ενώ η απορρόφηση των κατιόντων Ca^{2+} και Mg^{2+} , πιστεύεται ότι είναι παθητική (Mengel, 1984). Όσον αφορά την ικανότητα απορρόφησης των μικροστοιχείων (Fe, Cu, Zn, B, Mo, Mn) παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές, π.χ. η απορρόφηση του Mn φαίνεται να είναι ενεργητική σε χαμηλές συγκεντρώσεις (Sonneveld και Voogt, 1980), ενώ η απορρόφηση του B είναι παθητική (Dugger, 1973). Επομένως γίνεται εύκολα κατανοητό ότι η πρόσληψη κάθε θρεπτικού στοιχείου από τα φυτά πραγματοποιείται διαμέσου διαφορετικών μηχανισμών, έχοντας ως αποτέλεσμα διαφορές στην αποδοτικότητα της απορρόφησης και κατ' επέκταση απομάκρυνση διαφορετικών ποσοτήτων θρεπτικών στοιχείων από το θρεπτικό διάλυμα.

Οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στο αέριο περιβάλλον του θερμοκηπίου (ακτινοβολία, θερμοκρασία, σχετική υγρασία και συγκέντρωση CO_2) όσο και στο περιβάλλον της ρίζας (θερμοκρασία, συγκέντρωση O_2), επηρεάζουν την αύξηση και ανάπτυξη των φυτών, επιδρώντας στις φυσιολογικές τους λειτουργίες, όπως φωτοσύνθεση, διαπνοή, αναπνοή και απορρόφηση (Challa και Baker, 1995). Οι παράγοντες αυτοί διαμορφώνουν συνεπώς όχι μόνο τις απαιτήσεις των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία, αλλά επιδρούν και στην αφομοίωση τους και στην ικανότητα απορρόφησής τους.

Ο διαφορετικός τρόπος απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά αλλά και η επίδραση των κλιματικών παραμέτρων στη διαδικασία της απορρόφησης, περιπλέκουν τη διαδικασία διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος,

διότι καθιστούν δύσκολη την κατάρτιση προγραμμάτων λίπανσης και τον ακριβή προσδιορισμό των αναγκών των φυτών.

Ένα σημαντικό επίσης πρόβλημα, είναι η διαφορά που παρουσιάζει η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος στο επίπεδο της ριζόσφαιρας των φυτών εξαιτίας του διαφορετικού ρυθμού απορρόφησης των θρεπτικών στοιχείων από τα φυτά. Συνεπώς και η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος που απορρέει θα διαφέρει από αυτήν του διαλύματος που θα εφαρμοστεί. Πράγματι έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές των λόγων των θρεπτικών στοιχείων K/Mg , K/Ca και $(NO_3^- + H_2PO_4^-)/SO_4^{2-}$ στην περιοχή της ρίζας είναι αρκετά χαμηλότερες από αυτές του διαλύματος που εφαρμόζεται στην καλλιέργεια (Sonneveld, 1981; Ravin κ ά, 1998; Savvas, 2001). Επίσης οι συγκεντρώσεις αρκετών μακροστοιχείων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^-), εμφανίζονται υψηλότερες στην περιοχή της ρίζας, εξαιτίας της μικρότερης ικανότητας απορρόφησης από τα φυτά.

Έρευνες έχουν δείξει ότι τόσο η ημερήσια απορρόφηση των επιμέρους θρεπτικών στοιχείων όσο και οι αναλογίες απορρόφησης (μεταξύ των θρεπτικών) διαφέρουν αρκετά καθ' όλη τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου (Adams, 1980; Adams και Massey, 1984; Savvas και Lenz, 1995). Οι διαφορές αυτές αποδίδονται στη μεταβολή των απαιτήσεων των φυτών, η οποία σε βραχεία κλίμακα οφείλονται στις μεταβολές των κλιματικών συνθηκών και σε μακρά κλίμακα στο στάδιο ανάπτυξης της καλλιέργειας (π.χ. βλαστικό στάδιο, αναπαραγωγικό κ.λ.π.). Το γεγονός αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αλλάζει η σύνθεση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Οι αλλαγές αυτές στο απορρέον διάλυμα καθιστούν πιο σύνθετη τη διαδικασία επαναχρησιμοποίησής του, λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι πριν την επαναχρησιμοποίησή του θα πρέπει να εμπλουτιστεί με θρεπτικά στοιχεία και νερό σε ποσότητες που δεν μπορούν με ακρίβεια να εκτιμηθούν. Το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα σύνθετο από το γεγονός ότι στις εμπορικές θερμοκηπιακές καλλιέργειες η παραπάνω διαδικασία, πρέπει να είναι πλήρως αυτοματοποιημένη, πράγμα που συνεπάγεται την ανάγκη ανάπτυξης του κατάλληλου λογισμικού αλλά και του μηχανολογικού εξοπλισμού.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες που αναφέρθηκαν, δυο βασικές αρχές όσον αφορά τη ρύθμιση των συγκεντρώσεων στα θρεπτικά διαλύματα, έχουν αναπτυχθεί.

Ρύθμιση της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα με βάση την Αρχή της συγκέντρωσης απορρόφησης

Η αρχή αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η μέση απορρόφηση των θρεπτικών σε συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης, είναι παρόμοια για όλες τις ποικιλίες του ίδιου είδους. Σύμφωνα με την αρχή αυτή υπάρχει μια μέση απορρόφηση θρεπτικών από το φυτό και η οποία μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά. Για κάθε θρεπτικό στοιχείο, η μέση αυτή απορρόφηση συνήθως εκφράζεται ως ποσότητα θρεπτικού στοιχείου που απορροφάται ανά λίτρο νερού που διαπνέεται (Sonneveld, 1995; Voogt και Sonneveld, 1997; Sonneveld, 2000). Ο λόγος αυτός, που χαρακτηρίζεται ως **“συγκέντρωση απορρόφησης”** (uptake concentration), δεν έχει φυσιολογική βάση αφού η διαδικασίες πρόσληψης νερού και θρεπτικών είναι στις περισσότερες των περιπτώσεων ανεξάρτητες μεταξύ τους. Με τον πειραματικό προσδιορισμό του λόγου αυτού, είναι δυνατό να προσδιοριστούν και οι ποσότητες των θρεπτικών στοιχείων που πρέπει να προστίθενται ανά λίτρο διαλύματος που παρέχεται στα φυτά. Το θρεπτικό διάλυμα που προσδιορίζεται με αυτό τον τρόπο ονομάζεται **“πρότυπο θρεπτικό διάλυμα”**

Στους Πίνακες 2 και 3 παρουσιάζονται οι “συγκεντρώσεις απορρόφησης” και επομένως τα “πρότυπα θρεπτικά διαλύματα” για μερικές καλλιέργειες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση της συγκέντρωσης απορρόφησης ως οδηγό για την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων, αλλά και τη διόρθωσή τους μετά την ανακύκλωση με προσθήκη θρεπτικών στοιχείων, παρουσιάζει προβλήματα. Αυτό οφείλεται κυρίως στη διαφορά της εκτιμώμενης απορρόφησης και της πραγματικής απορρόφησης. Στις περιπτώσεις αυτές απαιτείται η τροποποίηση των προτύπων θρεπτικών διαλυμάτων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίοδος αρχές άνοιξης-τέλος καλοκαιριού, κατά την οποία οι ποσότητες του νερού που απορροφούνται είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές των θρεπτικών στοιχείων με αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσής τους στην περιοχή της ρίζας και τη δημιουργία προβλημάτων αλατότητας. Επομένως επιβάλλεται η αραίωση του πρότυπου θρεπτικού διαλύματος κατά την περίοδο αυτή.

Πίνακας 2. Συγκεντρώσεις απορρόφησης στοιχείων για διάφορες θερμοκηπιακές καλλιέργειες. Οι συγκεντρώσεις εκφράζονται σε mmol L⁻¹ νερού που απορροφάται (Sonneveld, 1997)

Καλλιέργεια	Θρεπτικό Στοιχείο					
	N	P	S	K	Ca	Mg
Αγγούρι	12,2	1,0	0,9	6,6	2,7	0,8
Πιπεριά	9,7	0,8	0,6	4,5	1,9	0,7
Ραπανάκι (καλοκαίρι)	8,6	0,4	0,4	4,5	1,2	0,4
Ραπανάκι (χειμώνας)	31,5	1,0	1,7	16,4	5,4	1,6
Τομάτα	9,6	1,1	1,2	6,1	2,2	0,9
Τριανταφυλλιά	5,2	0,4	0,4	1,9	0,9	0,3
Ζέρμπερα	10,2	0,7	0,4	7,0	1,6	0,5

Πίνακας 3. Πρότυπα θρεπτικά διαλύματα για καλλιέργειες τριαντάφυλλου και αγγουριού σε κλειστά υδροπονικά συστήματα (Sonneveld και Straver, 1994).

Μακροστοιχεία (mmol L ⁻¹)	Αγγούρι	Τριαντάφυλλο	Μικροστοιχεία (μmol L ⁻¹)	Αγγούρι	Τριαντάφυλλο
K	6,5	2,15	Fe	15	15
Ca	2,75	0,90	Mn	10	5
Mg	1,00	0,50	Zn	5	3
NH ₄ ⁺	1,00	0,85	Cu	0,75	0,50
NO ₃ ⁻	11,75	4,30	B	25	15
H ₂ PO ₄ ⁻	1,25	0,50	Mo	0,50	0,50
SO ₄ ³⁻	1,00	0,50			

Ρύθμιση της συγκέντρωσης των θρεπτικών στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα με βάση την Αρχή της ανάμιξης απορρέοντος διαλύματος και νερού δικτύου

Η αρχή αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στην περιοχή της ρίζας, είναι δυνατόν να διατηρηθούν κοντά στα επιθυμητά επίπεδα όταν το θρεπτικό διάλυμα που εφαρμόζεται στα φυτά σε κάθε κύκλο άρδευσης έχει συγκεκριμένη επιθυμητή σύνθεση (De Kreij, 1995). Ο έλεγχος της θρέψης της καλλιέργειας εξαρτάται από τη σύνθεση δυο θρεπτικών διαλυμάτων: α) του θρεπτικού διαλύματος που εφαρμόζεται στην καλλιέργεια και β) του θρεπτικού διαλύματος στην περιοχή της ρίζας. Η σύνθεση των δυο αυτών διαλυμάτων έχει προσδιοριστεί πειραματικά για αρκετές καλλιέργειες. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται η σύνθεση και των δυο διαλυμάτων για δυο διαφορετικές καλλιέργειες.

Πίνακας 4. Σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος (Α) που εφαρμόζεται στην καλλιέργεια και του θρεπτικού διαλύματος στην περιοχή της ρίζας (Β) για καλλιέργεια τριανταφυλλιάς και αγγουριού (Sonneveld και Straver, 1994).

Μακροστοιχεία (mmol L ⁻¹)	Αγγούρι		Τριαντάφυλλο	
	A	B	A	B
K	8,00	8,00	4,50	5,00
Ca	4,00	6,50	3,25	5,00
Mg	1,375	3,00	1,125	3,00
NH ₄ ⁺	1,25	<0,50	1,50	<0,50
NO ₃ ⁻	16,00	18,00	11,00	12,50
H ₂ PO ₄ ⁻	1,25	0,90	1,25	0,90
SO ₄ ³⁻	1,375	3,50	1,25	3,00
Μικροστοιχεία (μmol L ⁻¹)				
	A	B	A	B
Fe	15	15	25	25
Mn	10	7	5	3
Zn	5	7	3,5	3,5
Cu	0,75	1,5	0,75	1,0
B	25	50	20	20
Mo	0,50	-	0,50	-

Όσον αφορά τα ανοιχτά υδροπονικά συστήματα, ο προσδιορισμός της σύνθεσης του διαλύματος που θα εφαρμοστεί μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί με την πιο πάνω αρχή και με την προϋπόθεση ότι η χημική σύνθεση του νερού του δικτύου, που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος, διατηρείται σταθερή για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση όμως των κλειστών υδροπονικών συστημάτων, όπου η σύνθεση και ο όγκος του απορρέοντος διαλύματος μεταβάλλεται σε κάθε κύκλο άρδευσης, είναι περίπλοκος ο προσδιορισμός της ακριβούς σύνθεσης του διαλύματος και των ακριβών ποσοτήτων που πρέπει να προστίθενται στο μίγμα απορρέοντος και νερού δικτύου για τη διόρθωση του θρεπτικού διαλύματος πριν από κάθε κύκλο άρδευσης. Προς το παρόν δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα ο εξοπλισμός ο οποίος να καθιστά δυνατή, σε πραγματικό χρόνο, τη μέτρηση της σύνθεσης του απορρέοντος διαλύματος έτσι ώστε να είναι δυνατή η διόρθωσή του με την προσθήκη των απαραίτητων ποσοτήτων θρεπτικών στοιχείων (Van Os, 1999). Μια λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η συχνή εργαστηριακή ανάλυση της σύνθεσης του απορρέοντος διαλύματος (συνήθως κάθε 15ήμερο).

2.4 Στρατηγικές διαχείρισης θρεπτικού διαλύματος σε κλειστά υδροπονικά συστήματα

Για να είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος θα πρέπει να είμαστε σε θέση να προσδιορίσουμε τις αναλογίες μίξης αυτού με το νερό του δικτύου, πάντα με γνώμονα τις τιμές της EC που θέλουμε να επιτύχουμε στο τελικό θρεπτικό διάλυμα. Στη συνέχεια πρέπει να προσδιοριστούν οι ποσότητες λιπασμάτων που πρέπει να προστεθούν για να επιτύχουμε τις επιθυμητές συγκεντρώσεις θρεπτικών στοιχείων. Προκειμένου να ακολουθηθεί η όλη αυτή διαδικασία, είναι αναγκαίο οι παράμετροι που εμπλέκονται να είναι γνωστοί.

Οι κύριες παράμετροι που συνδέονται με τη διαδικασία επαναχρησιμοποίησης του απορρέοντος διαλύματος, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5. Κύριες παράμετροι που συνδέονται με τον εμπλουτισμό του απορρέοντος διαλύματος με νερό δικτύου και θρεπτικά στοιχεία

Παράμετροι	Περιγραφή
V_t	Ολικός όγκος (L) του θρεπτικού διαλύματος που δίδεται στα φυτά σε κάθε εφαρμογή άρδευσης
V_r	Ολικός όγκος (L) του απορρέοντος διαλύματος που συλλέγεται ύστερα από κάθε εφαρμογή άρδευσης
$V_t - V_r$	Ολικός όγκος (L) του νερού δικτύου που αναμιγνύεται με το απορρέον διάλυμα που συλλέγεται ύστερα από κάθε εφαρμογή άρδευσης
x/y	Αναλογία μίξης απορρέοντος διαλύματος και νερού δικτύου
E_t	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (dS m^{-1}) του θρεπτικού διαλύματος που εφαρμόζεται στα φυτά
E_r	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (dS m^{-1}) του απορρέοντος θρεπτικού διαλύματος
E_w	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (dS m^{-1}) του νερού δικτύου
E_m	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (dS m^{-1}) του μίγματος απορρέοντος διαλύματος και νερού δικτύου, πριν την προσθήκη των λιπασμάτων
E_u	Ηλεκτρική αγωγιμότητα (dS m^{-1}) του διαλύματος που προκύπτει μετά την προσθήκη των λιπασμάτων στο νερό του δικτύου και πριν τη μίξη του διαλύματος αυτού με το απορρέον
I_{if}	Ποσότητα του i θρεπτικού στοιχείου που προστίθεται στο θρεπτικό διάλυμα (meq L^{-1})

Από τα στοιχεία του Πίνακα 5, ισχύει εξορισμού ότι:

$$x = \frac{V_r}{V_t} \quad , \quad x = \frac{V_t - V_r}{V_t} \tag{1}$$

οπότε

$$y = 1 - x \quad (2)$$

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.3.2. οι στρατηγικές που μπορούν να εφαρμοστούν για την συμπλήρωση του διαλύματος απορροής με τις αναγκαίες ποσότητες νερού και θρεπτικών στοιχείων μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής τρεις κατηγορίες (Savvas, 2002):

1. Συμπλήρωση με προεπιλεγόμενη αναλογία μίξης απορρέοντος διαλύματος- νερού
2. Συμπλήρωση με ρυθμιζόμενη αναλογία μίξης απορρέοντος διαλύματος- νερού
3. Συμπλήρωση με αυτόματα μεταβαλλόμενη αναλογία έγχυσης λιπασμάτων

2.4.1 Παρασκευή θρεπτικού διαλύματος με προεπιλεγόμενη αναλογία μίξης απορρέοντος διαλύματος- νερού

Η τεχνική που ακολουθείται στην περίπτωση αυτή, βρίσκει εφαρμογή σε υδροπονικά συστήματα στα οποία η προετοιμασία και η παροχή του θρεπτικού διαλύματος στα φυτά γίνεται ταυτόχρονα. Η προετοιμασία του τελικού διαλύματος είτε περιλαμβάνει την παροχή μίγματος απορρέοντος διαλύματος και νερού δικτύου, ακολουθούμενη από πρόσθεση λιπασμάτων, απ' ευθείας στο σύστημα άρδευσης, είτε περιλαμβάνει την προσθήκη των λιπασμάτων στο νερό δικτύου και στο απορρέον διάλυμα σε δεξαμενή μίξης. Και στις δυο περιπτώσεις το απορρέον διάλυμα και το νερό δικτύου αναμιγνύονται σε σταθερή αναλογία, ενώ τα λιπάσματα προστίθενται σε σταθερές αναλογίες, από δεξαμενές που περιέχουν συμπυκνωμένα θρεπτικά διαλύματα, προκειμένου μια επιθυμητή τιμή E_i να επιτευχθεί (αναλυτικός υπολογισμός των θρεπτικών δίδεται στην επόμενη ενότητα).

Η χρήση σταθερού λόγου x/y μειονεκτεί διότι δεν δίνεται η δυνατότητα στο σύστημα, αυτόματης διόρθωσης του λόγου, σε περίπτωση που η E_i ή το κλάσμα απορροής είναι διαφορετικό σε κάθε εφαρμογή της άρδευσης. Αυτό έχει μεγάλη σημασία διότι αφενός μεν όταν το κλάσμα απορροής (επιπλέον ποσότητα θρεπτικού διαλύματος για έκπλυση αλάτων) είναι μεγαλύτερο από το λόγο x/y , τότε αναπόφευκτα θα έχουμε αποβολή μέρους των απορρέοντος και επομένως

παύει να υφίσταται η αρχή του κλειστού υδροπονικού συστήματος και αφετέρου δε όταν μεταβάλλεται η E_r αναπόφευκτα πρέπει να ρυθμίζονται εκ νέου οι ποσότητες λιπασμάτων που πρέπει να προστεθούν.

2.4.2 Παρασκευή θρεπτικού διαλύματος με ρυθμιζόμενη αναλογία μίξης απορρέοντος διαλύματος- νερού

Στα κλειστά υδροπονικά συστήματα υπάρχουν δυο βασικές τεχνικές επαναχρησιμοποίησης του απορρέοντος διαλύματος, σύμφωνα με τη στρατηγική αυτή:

- 1. Προσθήκη των λιπασμάτων σε συγκεκριμένη ποσότητα του νερού δικτύου πριν τη μίξη με το διάλυμα απορροής
- 2. Μίξη του απορρέοντος διαλύματος και του νερού δικτύου, πριν την προσθήκη των λιπασμάτων

2.4.2.1 Προσθήκη των λιπασμάτων σε συγκεκριμένη ποσότητα του νερού δικτύου πριν τη μίξη με το διάλυμα απορροής

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται όταν οι δόσεις των θρεπτικών στοιχείων που απαιτούνται για τον εμπλουτισμό του απορρέοντος διαλύματος προσδιορίζονται με βάση την αρχή της συγκέντρωσης απορρόφησης (uptake concentration).

Όταν εφαρμόζεται η τεχνική αυτή, η EC του τελικού θρεπτικού διαλύματος που δίδεται στα φυτά (E_t), εκτιμάται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_t = xE_r + yE_u \tag{3}$$

αντικαθιστώντας τη σχέση (2) στην (3) και λύνοντας ως προς x , είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ποσότητα x συναρτήσει των μεταβλητών E_t , E_u , E_r :

$$x = \frac{E_t - E_u}{E_r - E_u} \tag{4}$$

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- 1. Η τιμή E_t δίδεται στο σύστημα ως προκαθορισμένη τιμή

2. Η τιμή E_u επίσης δίδεται ως προκαθορισμένη και βασίζεται σε δεδομένα που στηρίζονται στην αρχή της συγκέντρωσης απορρόφησης
3. Έχοντας ως δεδομένες τις τιμές E_t , E_u και την E_r (μετρούμενη με αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο), υπολογίζεται βάση της σχέσης (4) ο επιθυμητός λόγος x/y
4. Σύμφωνα με την αρχή της απορρόφησης συγκέντρωσης η ποσότητα (I'_{if}) του i θρεπτικού στοιχείου που θα πρέπει να προστεθεί είναι :

$$I'_{if} = C_{iu} - C_{iw} \quad (5)$$

όπου C_{iu} και C_{iw} είναι η συγκέντρωση απορρόφησης του i στοιχείου και η συγκέντρωση στο νερό δικτύου του i στοιχείου, αντίστοιχα.

5. Επομένως η ποσότητα (I_{if}) του i θρεπτικού στοιχείου που τελικά θα προστεθεί από τη δοσομετρική αντλία είναι

$$I_{if} = xC_{ir} + yC_{iw} + yI'_{if} \quad (6)$$

όπου C_{ir} είναι η συγκέντρωση του i στοιχείου στο απορρέον διάλυμα.

Είναι φανερό ότι με την τεχνική αυτή είναι δυνατή η **αυτόματη ρύθμιση της αναλογίας μίξης** απορρεόμενου διαλύματος- νερού (λόγου x/y) όταν η E_r , διαφέρει από την αναμενόμενη (σε κάθε εφαρμογή άρδευσης). Ταυτόχρονα υπολογίζεται και η ποσότητα (I_{if}) των θρεπτικών στοιχείων που τελικά θα προστεθούν στο αρχικό μίγμα. Παρ' όλα αυτά δεν δίνεται η δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης του λόγου x/y και των ποσοτήτων των θρεπτικών όταν η ποσότητα x διαφέρει από το κλάσμα απορροής, που απαιτείται για να διατηρηθεί η E_t .

2.4.2.2 Μίξη του απορρέοντος διαλύματος και του νερού δικτύου, πριν την προσθήκη των λιπασμάτων

Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται όταν οι δόσεις των θρεπτικών στοιχείων που απαιτούνται για τον εμπλουτισμό του απορρέοντος διαλύματος προσδιορίζονται με βάση την αρχή της ανάμιξης απορρέοντος διαλύματος και νερού δικτύου.

Όταν εφαρμόζεται η τεχνική αυτή, η EC του διαλύματος που προκύπτει μετά τη μίξη (E_m), εκτιμάται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E_m = xE_r + yE_w \quad (7)$$

αντικαθιστώντας τη σχέση (2) στην (7) και λύνοντας ως προς x , είναι δυνατό να εκτιμηθεί η ποσότητα x συναρτήσει των μεταβλητών E_m , E_w , E_r :

$$x = \frac{E_m - E_w}{E_r - E_w} \quad (8)$$

Σύμφωνα με την τεχνική αυτή ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Η τιμή E_m δίδεται στο σύστημα ως προκαθορισμένη τιμή, ενώ οι τιμές E_r , E_w μπορούν να προσδιοριστούν με αισθητήρες. Με βάση τη σχέση (8) εκτιμάται η τιμή x και επομένως ο λόγος x/y
2. Δεδομένου ότι ο λόγος x/y έχει εκτιμηθεί, η συγκέντρωση (C_{im}) του i θρεπτικού στοιχείου στο μίγμα που θα προκύψει, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$C_{im} = xC_{ir} + yC_{iw} \quad (9)$$

όπου C_{ir} και C_{iw} είναι η συγκέντρωση του i στοιχείου στο απορρέον διάλυμα (προσδιορίζεται με τακτικές εργαστηριακές αναλύσεις) και στο νερό δικτύου, αντίστοιχα.

3. Επομένως η ποσότητα (I_{if}) του i θρεπτικού στοιχείου που τελικά θα προστεθεί από τη δοσομετρική αντλία, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_{if} = C_{it} - C_{im}$$

όπου C_{it} η συγκέντρωση του i στοιχείου που πρέπει να περιέχεται, σύμφωνα με την αρχή της ανάμιξης απορρέοντος διαλύματος και νερού δικτύου (προσδιορίζεται πειραματικά), στο τελικό θρεπτικό διάλυμα.

Απαραίτητος είναι ο έλεγχος της E_t πριν το διάλυμα διοχετευτεί στα φυτά

Με την τεχνική αυτή είναι δυνατή η **αυτόματη ρύθμιση της αναλογίας μίξης** απορρέοντος διαλύματος- νερού (λόγου x/y) όταν η E_r , διαφέρει από την αναμενόμενη, σε κάθε εφαρμογή άρδευσης. Ωστόσο δεν δίνεται η δυνατότητα αυτόματης ρύθμισης του λόγου x/y και των ποσοτήτων των θρεπτικών όταν η ποσότητα x διαφέρει από το κλάσμα απορροής, που απαιτείται για να διατηρηθεί η E_t .

2.4.3 Παρασκευή θρεπτικού διαλύματος με αυτόματα μεταβαλλόμενη αναλογία έγχυσης λιπασμάτων

Σύμφωνα με τη στρατηγική αυτή, τόσο ο όγκος (V_r) όσο και η (E_r) του απορρέοντος διαλύματος είναι δυνατό να προσδιορίζονται σε πραγματικό χρόνο, με τη βοήθεια του κατάλληλου εξοπλισμού. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά είναι δυνατός ο υπολογισμός των ποσοτήτων των θρεπτικών και του νερού που πρέπει να προστεθούν ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή E_t .

Με τον υπολογισμό του όγκου (V_r), μπορεί να υπολογιστεί σε πραγματικό χρόνο η αναλογία μίξης x/y από την εξίσωση (1), ενώ στη συνέχεια με βάση την προσδιοριζόμενη E_r και τη χρήση αλγορίθμων (Savvas και Manos, 1999) υπολογίζονται οι αναγκαίες ποσότητες θρεπτικών και νερού. Η τεχνική αυτή καθιστά δυνατή την ταυτόχρονη μέτρηση του λόγου x/y και των ποσοτήτων των λιπασμάτων (I_{if}) ανεξαρτήτως μεταβολών στην E_r , κάτι που δεν είναι εφικτό από καμία από τις προαναφερθείσες στρατηγικές. Παρ' όλες τις δυνατότητες που προσφέρει η τεχνική αυτή, δεν χρησιμοποιείται ακόμη σε εμπορική κλίμακα αλλά βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας.

2.5 Εφαρμογή αυτοματισμών στα κλειστά υδροπονικά συστήματα

Οποιαδήποτε στρατηγική και αν ακολουθηθεί από τις προαναφερθείσες, η ρύθμιση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος βασίζεται στη ρύθμιση των παραμέτρων του θρεπτικού διαλύματος: pH και EC, στην τακτική εργαστηριακή ανάλυση του απορρέοντος διαλύματος και του νερού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την άρδευση (όσον αφορά τη συγκέντρωση των θρεπτικών στοιχείων), καθώς επίσης και στην εκτίμηση των αναγκαίων ποσοτήτων θρεπτικών στοιχείων που απαιτούνται από τα φυτά σε κάθε στάδιο ανάπτυξης (με στατιστικά ή μηχανιστικά μοντέλα). Τα τελευταία χρόνια με την εισαγωγή των μικροϋπολογιστών στη γεωργία κατέστη δυνατή, η αυτοματοποίηση της διαχείρισης του θρεπτικού διαλύματος. Οι επιθυμητές τιμές των παραμέτρων αυτών εισάγονται στο σύστημα ελέγχου, που αποτελείται από μια κεντρική

μονάδα Η/Υ, καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις που συνδέουν τις διάφορες παραμέτρους μεταξύ τους (όπως αυτές που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα) με τη μορφή αλγορίθμων. Με το κατάλληλο λογισμικό επικοινωνίας γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις στο θρεπτικό διάλυμα.

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η τροφοδοσία του συστήματος ελέγχου με τα απαραίτητα θρεπτικά στοιχεία, είναι αναγκαία η ύπαρξη αισθητήρων μέσω των οποίων να γίνεται η καταγραφή των τιμών των παραμέτρων που εμπλέκονται στη διαδικασία διαχείρισης. Όσον αφορά το pH και την EC των διαλυμάτων (του θρεπτικού που εφαρμόζεται, του διαλύματος στην περιοχή της ρίζας και του απορρέοντος), η χρήση αισθητήρων είναι ευρέως διαδεδομένη. Είναι αισθητήρες που η λειτουργία τους βασίζεται στη διαφορά δυναμικού μεταξύ δυο ηλεκτροδίων. Η ποτενσιομετρική αυτή διαφορά συσχετίζεται βάση βαθμονόμησης με την μετρούμενη παράμετρο (για το pH η ενεργός οξύτητα και την EC η ολική συγκέντρωση ιόντων). Οι αισθητήρες αυτοί ενυπάρχουν σε κάθε σύστημα διαχείρισης θρεπτικού διαλύματος και με το κατάλληλο λογισμικό επικοινωνίας, τροφοδοτούν την κεντρική μονάδα ελέγχου. Την τελευταία δεκαετία άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε πειραματική κλίμακα και αισθητήρες για τη μέτρηση μεμονωμένων στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η ενσωμάτωση των αισθητήρων αυτών στα ήδη υπάρχοντα συστήματα, θα μπορούσε να συντελέσει στην πλήρη αυτοματοποίηση των συστημάτων, δίνοντας τη δυνατότητα ελέγχου και διαχείρισης σε πραγματικό χρόνο. Οι δυο κύριες κατηγορίες των αισθητήρων είναι:

Οι αισθητήρες ISE (Ion Selective Electrode)

Οι αισθητήρες αυτοί αποτελούνται από μια μεμβράνη και δυο ηλεκτρόδια. Η μεμβράνη κατασκευάζεται από ειδικό υλικό (οργανικές ενώσεις ή πολυμερή) και έχει την ικανότητα να συγκρατεί ιόντα. Αυτό δημιουργεί μια διαφορά δυναμικού μεταξύ της μεμβράνης και ενός ηλεκτροδίου, που περικλείεται στη μεμβράνη και η οποία διαφορά δυναμικού συνδέεται με το λογάριθμο της συγκέντρωσης του ιόντος. Το κυριότερο μειονέκτημα των αισθητήρων αυτών είναι η πολύ μικρή διάρκεια ζωής (μέχρι 3 μήνες), εξ αιτίας της καταστροφής (αποσύνθεση) της μεμβράνης (Gielsing κ ά, 1989). Επίσης η ακρίβεια και η ευαισθησία των αισθητήρων αυτών δεν είναι η ενδεικνυόμενη (Heinen και Harmanny, 1992): π.χ.

για αισθητήρα μέτρησης της συγκέντρωσης Ca^{2+} μια μεταβολή κατά 1 mV στην τάση αντιστοιχεί σε μεταβολή της συγκέντρωσης κατά 8%.

Οι αισθητήρες αυτοί είναι διαθέσιμοι για τη μέτρηση των περισσότερων μακροστοιχείων: K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} και NH_4^+ καθώς και άλλων όπως του Cl^- . Ωστόσο η χρήση τους είναι περιορισμένη σε εμπορική κλίμακα.

Οι αισθητήρες ISFET (Ion Selective Field Effect Electrode)

Η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων αυτών είναι παρόμοια με των προηγούμενων ενώ τα κύρια μέρη και τα υλικά από τα οποία αποτελούνται, είναι ίδια. Η διαφορά με αυτούς της προηγούμενης κατηγορίας είναι ότι περιέχουν έναν ενσωματωμένο ημιαγωγό που διεγείρεται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται περιμετρικά της μεμβράνης. Η συγκέντρωση του ιόντος μεταφράζεται σε μεταβολή της αγωγιμότητας στην επιφάνεια του ημιαγωγού και συνδέεται λογαριθμικά με αυτή (Bailey, κ ά, 1988). Τα μειονεκτήματα των αισθητήρων αυτών είναι παρόμοια με των αισθητήρων ISE, παρ' όλα αυτά παρουσιάζουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους και της δυνατότητας μαζικής παραγωγής.

Τα σύγχρονα συστήματα διαχείρισης υδροπονικών καλλιεργειών επιτρέπουν έως ένα βαθμό τον αυτόματο έλεγχο του θρεπτικού διαλύματος. Η περαιτέρω βελτίωση των παραπάνω συστημάτων θα καταστεί δυνατή με τη χρήση αισθητήρων τύπου ISE ή ISFET. Τα τελευταία χρόνια διεθνώς παρατηρείται η τάση ανάπτυξης και εφαρμογής έμπειρων συστημάτων τα οποία θα επιτρέπουν σε πραγματικό χρόνο:

- Την παρακολούθηση της αύξησης και ανάπτυξης των φυτών
- Τον προσδιορισμό των αναγκών της καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία και νερό
- Τη ρύθμιση της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος βάσει των επιμέρους θρεπτικών στοιχείων και όχι μέσω της EC, διαφοροποιώντας τον έλεγχο προσθήκης νερού και θρεπτικών

Τα έμπειρα συστήματα ενσωματώνουν μοντέλα προσομοίωσης ανάπτυξης της καλλιέργειας, τα οποία λαμβάνοντας δεδομένα από αισθητήρες (σχετική υγρασία, θερμοκρασία, ακτινοβολία) είναι σε θέση να τροφοδοτούν τη μονάδα ελέγχου με πληροφορίες για τις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες της καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία και νερό. Παράλληλα ενσωματώνουν μοντέλα

που περιγράφουν τη συμπεριφορά των υποστρωμάτων και τα οποία είναι σε θέση να προβλέπουν τις μεταβολές των παραμέτρων στο περιβάλλον της ρίζας (EC, συγκέντρωση θρεπτικών, ποσοστό και κατανομή υγρασίας). Τα απαραίτητα δεδομένα τα λαμβάνουν από αισθητήρες (τύπου ISE και ISFET, τενσιόμετρα, αισθητήρες EC-pH) και στη συνέχεια διαβιβάζουν τις πληροφορίες στη μονάδα ελέγχου. Τα μοντέλα προσομοίωσης ανάπτυξης και υποστρωμάτων καθώς και οι αισθητήρες επικοινωνούν μεταξύ τους με κατάλληλο λογισμικό και έχουν τη δυνατότητα να ανταλλάσσουν πληροφορίες με την κεντρική μονάδα ελέγχου, ώστε οι επεμβάσεις της τελευταίας να αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της παραγωγής.

Με τη χρήση των συστημάτων αυτών παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο οι ανάγκες της καλλιέργειας σε θρεπτικά στοιχεία καθώς αυτή αναπτύσσεται, με αποτέλεσμα η προσθήκη των στοιχείων να μη γίνεται με βάση τις συγκεντρώσεις απορρόφησης ή με βάση τους αμοιβαίους λόγους θρεπτικών στην περιοχή της ρίζας. Η προσθήκη θρεπτικών μπορεί πλέον να επιτευχθεί με την απ' ευθείας παρακολούθηση των κλιματικών παραμέτρων και των παραμέτρων στο περιβάλλον της ρίζας.

Στα έμπειρα συστήματα και κυρίως στα μοντέλα αύξησης και ανάπτυξης, μέσω των οποίων εκτιμώνται οι ανάγκες των φυτών σε θρεπτικά στοιχεία (επομένως και οι ποσότητες που θα προστεθούν), είναι μεγάλης σημασίας η εισαγωγή του χρόνου, όσον αφορά τη χρονική κλίμακα του ελέγχου. Ο καθορισμός του χρόνου απόκρισης (διαστημάτων μεταξύ δυο διαδοχικών ελέγχων) των συστημάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την συμπεριφορά της καλλιέργειας, προκειμένου η εκτέλεση των αποφάσεων από τη μονάδα ελέγχου να γίνεται στο βέλτιστο χρόνο. Επομένως είναι αναγκαίο να καθοριστεί για κάθε καλλιέργεια ξεχωριστά, το χρονικό διάστημα που πρέπει να μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών ελέγχων της σύνθεσης του θρεπτικού διαλύματος προκειμένου η προσθήκη των θρεπτικών στοιχείων να μην λαμβάνει χώρα έγκαιρα και να παραμένει συντονισμένη προς τις ανάγκες της καλλιέργειας, αφετέρου δε να γίνεται με γνώμονα τη μείωση των εισροών. Γίνεται ευκόλως κατανοητό πως ο προσδιορισμός του χρόνου απόκρισης θα πρέπει να γίνει όχι μόνο για κάθε καλλιέργεια αλλά και για κάθε θρεπτικό στοιχείο ξεχωριστά. Με τον προσδιορισμό του χρόνου απόκρισης δίδεται η δυνατότητα στο σύστημα να ελέγχει και να

προσθέτει αυτόνομα και μεμονωμένα τις χρηστές ποσότητες των επιμέρους θρεπτικών στοιχείων έγκαιρα.

ΜΕΡΟΣ 2^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 Περιγραφή θερμοκηπίου

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε δυο περιόδους, τον Ιούλιο του 2002 (P1) και τον Απρίλιο του 2003 (P2) σε πολλαπλό αμφίρρικτο θερμοκήπιο στο αγρόκτημα του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, στην περιοχή του Βελεστίνου (ΓΠ 39^ο44' και ΓΜ 22^ο79').

Το θερμοκήπιο είναι κατασκευασμένο από γαλβανισμένο χάλυβα, με γυάλινη κάλυψη και αποτελείται από πέντε ξεχωριστούς θαλάμους (Εικόνα 14).



Εικόνα 14. Άποψη του πειραματικού θερμοκηπίου. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στον τρίτο θάλαμο από αριστερά.

Η συνολική έκταση του θερμοκηπίου είναι 1000 m², ενώ ο θάλαμος που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις κάλυπτε 200 m². Το θερμοκήπιο έχει προσανατολισμό Βορρά-Νότου με διαστάσεις: μήκος 31 m, πλάτος 6,5 m, ύψος ορθοστάτη 2,9 m, ύψος κορφιά 4 m και γωνία κλίσης οροφής 20⁰. Το έδαφος του θερμοκηπίου ήταν πλήρως καλυμμένο με τσιμέντο.

3.2 Περιγραφή καλλιέργειας

Στο θερμοκήπιο υπήρχε εγκατεστημένη υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς (*Rosa hybrida* cv Iceberg), με τη μέθοδο DFT (Deep Flow Technique) σε κλειστό υδροπονικό σύστημα (Εικόνα 15).

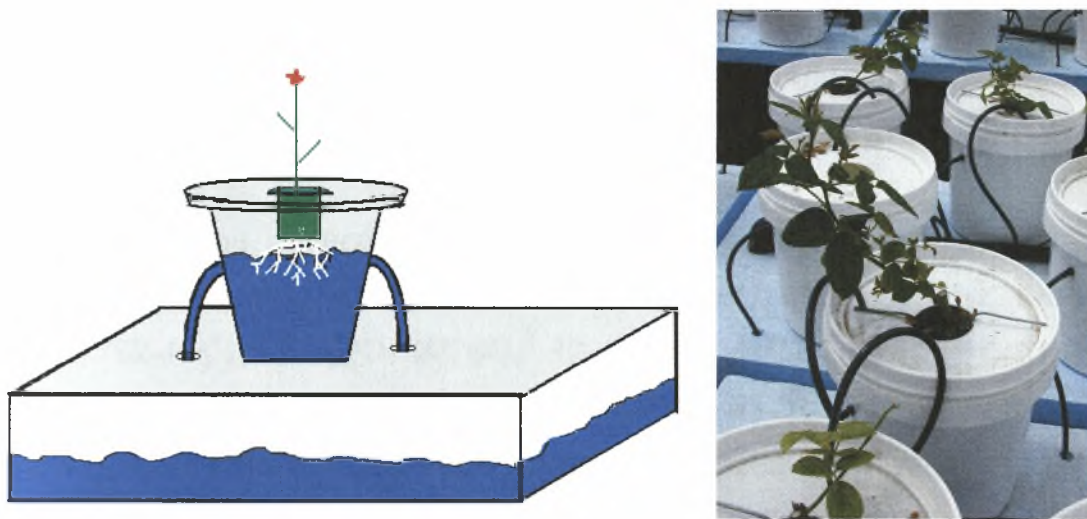


Εικόνα 15. Άποψη καλλιέργειας τριανταφυλλιάς

Η καλλιέργεια, για την περίοδο P1, εγκαταστάθηκε τον Ιούνιο του 2002 και για τη περίοδο P2, εγκαταστάθηκε τον Ιανουάριο του 2003. Η πυκνότητα φύτευσης και στις δυο περιόδους ήταν 2 φυτά m⁻². Από την εγκατάσταση της καλλιέργειας μέχρι και την έναρξη των μετρήσεων γινόταν περιοδικά κλάδεμα (τσίμπημα) πλάγιων

οφθαλμών, προκειμένου να αναπτυχθεί μόνο ο κεντρικός βλαστός (μονοστέλεχα φυτά). Η έναρξη των μετρήσεων, έγινε 55 ημέρες μετά την εγκατάσταση των φυτών για τη περίοδο P1 και 90 ημέρες μετά την εγκατάσταση των φυτών για τη περίοδο P2.

Τα φυτά κατά την εγκατάσταση, βρίσκονταν στο στάδιο των δυο φύλλων ανεπτυγμένα σε κύβους προβλάστησης πετροβάμβακα και τοποθετήθηκαν σε φυτοδοχεία όγκου 3 L. Τα φυτοδοχεία τοποθετήθηκαν ανά 5, πάνω σε δεξαμενές χωρητικότητας 50 L, στις οποίες γινόταν η συλλογή του απορρεόμενου διαλύματος με υπερχείλιση από τα φυτοδοχεία (Εικόνα 16).



Εικόνα 16. Φυτοδοχεία τοποθετημένα πάνω σε δεξαμενές, για την απορροή του θρεπτικού διαλύματος

Οι δεξαμενές ήταν συνδεδεμένες μεταξύ τους με δίκτυο σωληνώσεων, προκειμένου να είναι δυνατή η ανακύκλωση του διαλύματος. Για την ανακύκλωση του θρεπτικού διαλύματος χρησιμοποιήθηκε αντλία δυναμικότητας 80 L h^{-1} η οποία λειτουργούσε για χρονικό διάστημα 15 min, τέσσερις φορές ανά ώρα.

Η παροχή θρεπτικού διαλύματος στα φυτά γινόταν με σταλάκτες, παροχής 6 L h^{-1} , που ήταν τοποθετημένοι στο επάνω μέρος των κύβων προβλάστησης.

Η σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος που εφαρμοζόταν σε mg L^{-1} , ήταν: NO_3^- 762, NH_4^+ 18, H_2PO_4^- 97, SO_4^{3-} 72, K^+ 253, Ca^{2+} 160, Mg^{2+} 24, Fe 1,7, B 0,28, Cu 0,6, Mo 0,027, Mn 0,5, Zn 0,23. Η αλλαγή του θρεπτικού διαλύματος και η αντικατάστασή του με νέο διάλυμα, γινόταν κάθε δυο ημέρες.

Οι αρχικές τιμές pH και EC του θρεπτικού διαλύματος ήταν 5,5 και 1,7 dS m⁻¹, αντίστοιχα.

3.3 Πειραματική διάταξη

Το πειραματικό σχέδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν πλήρως τυχαίο, με δυο επαναλήψεις και τρεις μεταχειρίσεις. Οι μεταχειρίσεις αφορούσαν: έκθεση των φυτών σε μια, τρεις και επτά ημέρες έλλειψη Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ και στη συνέχεια τοποθέτηση των φυτών σε κανονικό θρεπτικό διάλυμα. Τα φυτά της κάθε μεταχείρισης επιλέχθηκαν τυχαία και τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές οι οποίες απομονώθηκαν από το δίκτυο των υπολοίπων δεξαμενών. Όσον αφορά τις μεταχειρίσεις για κάθε ένα θρεπτικό στοιχείο, ακολουθήθηκαν τα εξής:

Έλλειψη Ca²⁺

Τα φυτά που εκτεθούν σε συνθήκες έλλειψης Ca²⁺ τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές οι οποίες περιείχαν θρεπτικό διάλυμα της ακόλουθης σύνθεσης (σε mg L⁻¹): NO₃⁻ 762, NH₄⁺ 23, H₂PO₄⁻ 97, SO₄³⁻ 72, K⁺ 253, Mg²⁺ 24, Fe 1,7, B 0,28, Cu 0,7, Mo 0,027, Mn 0,5, Zn 0,3. Για την περίοδο P1 το pH του θρεπτικού διαλύματος κυμαινόταν από 5,5 έως 6 και η EC από 1,7 έως 2,2 dS m⁻¹. Για την περίοδο P2 οι τιμές του pH κυμαινόταν από 5,5 έως 6 και η EC από 1,5 έως 1,7.

Έλλειψη Mg²⁺

Τα φυτά που εκτέθηκαν σε συνθήκες έλλειψης Mg²⁺ τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές οι οποίες περιείχαν θρεπτικό διάλυμα της ακόλουθης σύνθεσης (σε mg L⁻¹): NO₃⁻ 963, NH₄⁺ 23, H₂PO₄⁻ 97, SO₄³⁻ 105, K⁺ 278, Ca²⁺ 160, Fe 2,58, B 0,28, Cu 0,8, Mo 0,027, Mn 0,5, Zn 0,3. Για την περίοδο P1 το pH κυμαινόταν από 5,5 έως 6 και η EC από 1,8 έως 2,2 dS m⁻¹. Για την περίοδο P2 οι τιμές του pH του θρεπτικού διαλύματος κυμαινόταν από 5,5 έως 6 και η EC από 1,6 έως 2,2.

Έλλειψη K⁺

Τα φυτά που εκτέθηκαν σε συνθήκες έλλειψης K⁺ τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές οι οποίες περιείχαν θρεπτικό διάλυμα της ακόλουθης σύνθεσης (σε mg L⁻¹): NO₃⁻ 715, NH₄⁺ 23, H₂PO₄⁻ 97, SO₄³⁻ 198, Ca²⁺ 160, Mg²⁺ 24, Fe 2,58, B 0,28, Cu 0,8, Mo 0,027, Mn 0,5, Zn 0,3. Για την περίοδο P1 το pH του θρεπτικού διαλύματος κυμαινόταν από 5,5 έως 6 και η EC από 1,7 έως 2,2 dS m⁻¹. Για την

περίοδο P2 οι τιμές του pH του θρεπτικού διαλύματος κυμαινόταν από 5,5 έως 6 και η EC από 1,6 έως 2,2.

Η συγκέντρωση του Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ στο νερό δικτύου το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος, με το οποίο τροφοδοτήθηκαν τα φυτά μάρτυρες, ήταν: 70, 41 και 10, mg L^{-1} αντίστοιχα. Για την περίοδο P1 χρησιμοποιήθηκε νερό βρύσης και για την παρασκευή των διαλυμάτων με τα οποία τροφοδοτήθηκαν τα φυτά των μεταχειρίσεων (συνθήκες έλλειψης). Η αυξημένη όμως περιεκτικότητα του νερού σε Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ δεν επέτρεψε την παρασκευή θρεπτικών διαλυμάτων με μηδενική περιεκτικότητα στα παραπάνω θρεπτικά στοιχεία. Για το λόγο αυτό, την περίοδο P2, για την παρασκευή των θρεπτικών διαλυμάτων των μεταχειρίσεων, χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό εμπορίου του οποίου η σύνθεση (mg L^{-1}) σε Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ ήταν: 5,8-15,9, 2,8-8,2 και 0, αντιστοίχως.

Τα φυτά τοποθετήθηκαν στα παραπάνω διαλύματα για χρονικό διάστημα 1, 3 και 7 ημέρες, ενώ μετά το πέρας των διαστημάτων αυτών τα φυτά τοποθετήθηκαν σε δεξαμενές που περιείχαν θρεπτικό διάλυμα ίδιας σύστασης με αυτό στο οποίο αναπτύσσονταν τα φυτά μάρτυρες (περίοδος επανατροφοδότησης). Σε κάθε δειγματοληψία λαμβάνονταν 5 φυτά από κάθε μεταχείριση και 5 φυτά μάρτυρες.

3.4 Μετρήσεις

Οι μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αφορούσαν τους κλιματικούς παράγοντες στο εσωτερικό του θερμοκηπίου (R_s , T , HR), τα χημικά χαρακτηριστικά του θρεπτικού διαλύματος (pH, EC), τη χημική σύνθεση του θρεπτικού διαλύματος και την περιεκτικότητα των διαφόρων φυτικών μερών (φύλλα, άνθη, βλαστό, ρίζα) σε Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ .

Κλιματικοί παράγοντες

Κατά τη διάρκεια των περιόδων P1 και P2 καταγράφονταν:

- η θερμοκρασία (T , $^{\circ}\text{C}$) και η σχετική υγρασία (HR , %) με αεριζόμενο ψυχρόμετρο τύπου Assman (τύπος VP1, Delta-T Devices, Cambridge UK).

Η σχετική υγρασία του αέρα υπολογιζόταν από μετρήσεις της θερμοκρασίας του υγρού και ξηρού θερμομέτρου.

- Η ηλιακή ακτινοβολία (R_s , $W\ m^{-2}$) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου με πυρανόμετρο (τύπος CM-6B, Kipp and Zonen, Delft, The Netherlands)

Τα όργανα ήταν τοποθετημένα στο κέντρο του θερμοκηπίου και σε ύψος 30 cm πάνω από το επίπεδο των φυτών (Εικόνα 17). Για τη συλλογή, την αρχική επεξεργασία και την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε σύστημα συλλογής και καταγραφής δεδομένων (DL 3000, Delta-T Devices, Cambridge UK). Οι μετρήσεις λαμβάνονταν κάθε 30 δευτερόλεπτα και κάθε 10 λεπτά καταγραφόταν η μέση τιμή όλων των παραμέτρων.

Χαρακτηριστικά θρεπτικού διαλύματος

Καθ' όλο το διάστημα των μετρήσεων και για τις δυο περιόδους καθημερινά γίνονταν μετρήσεις του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC , $dS\ m^{-1}$) τόσο στο κανονικό θρεπτικό διάλυμα (φυτά μάρτυρες) όσο και στα διαλύματα με τα υπό έλλειψη στοιχεία. Για τη μέτρηση του pH χρησιμοποιήθηκε φορητό πεχάμετρο (τύπος HI 8314, Hannon Instruments), ενώ για την ηλεκτρική αγωγιμότητα φορητό αγωγιμόμετρο (τύπος HI 8633, Hannon Instruments). Έλεγχος και μέτρηση των παραπάνω χαρακτηριστικών λάμβανε χώρα κάθε φορά και κατά την προετοιμασία του νέου θρεπτικού διαλύματος στα φυτά μάρτυρες. Η διόρθωση του pH γινόταν είτε με χρήση οξέος (HNO_3 1M) είτε με χρήση βάσης (KOH , 1M).



Εικόνα 17. Όργανα μετρήσεων κλιματικών παραγόντων εντός του θερμοκηπίου

Χημικές αναλύσεις θρεπτικού διαλύματος και φυτικών μερών

Ο προσδιορισμός των επιπέδων Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^{+} στα θρεπτικά διαλύματα (κατά την προετοιμασία και κατά την εφαρμογή τους) και στα διάφορα μέρη των φυτών έγιναν με τη χρήση συστήματος Ιοντικής Υγρής Χρωματογραφίας (τύπος Alltech Model 550, Conductivity Detector, Alltech Association Inc., USA).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην κάθε περίπτωση ήταν η εξής:

- Η ανάλυση των δειγμάτων των θρεπτικών διαλυμάτων γινόταν μερικές ώρες μετά τη δειγματοληψία αυτών και με αναλογία αραίωσης 1:100
- Τα φυτά μετά τη μεταφορά τους στο εργαστήριο, διαχωρίζονταν στα επιμέρους φυτικά μέρη (φύλλα, ρίζες, βλαστούς και άνθη) και στη συνέχεια ακολουθούσε ελαφρά πλύση αυτών πρώτα με νερό βρύσης και στη συνέχεια με απιονισμένο νερό, για την απομάκρυνση σκόνης, υπολειμμάτων φαρμάκων κλπ. Ακολούθως τοποθετούνταν σε ξηραντήριο στους 105 °C για 24 h για την πλήρη ξήρανσή τους και στη συνέχεια ζυγίζονταν για την καταγραφή του Ξ.Β. gr (Ξηρού Βάρους). Εν συνεχεία τεμαχίζονταν και τοποθετούνταν σε πυραντήριο στους 480 °C για χρονικό διάστημα 4 h. Μετά την καύση υφίσταντο επεξεργασία με διάλυμα 1M HCl

(2 ml κάθε δείγμα) και βρασμό στους 90 °C για χρονικό διάστημα 30 min. Μετά το πέρας της διαδικασίας και ύστερα από αραιώση σε αναλογία 1:400 γινόταν η ανάλυση των δειγμάτων στο χρωματογράφο

Για την περίοδο P1 προσδιορίστηκαν τα επίπεδα Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ στα φύλλα ύστερα από 1, 3 και 7 ημέρες σε συνθήκες έλλειψης και ύστερα από επανατροφοδότηση των φυτών αυτών για 1, 3 και 7 ημέρες σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα. Για την περίοδο P2 προσδιορίστηκαν τα επίπεδα των τριών στοιχείων στα φύλλα, στους βλαστούς στις ρίζες και στα άνθη για τα ίδια χρονικά διαστήματα (συνθήκες έλλειψης και πλήρες θρεπτικό διάλυμα).

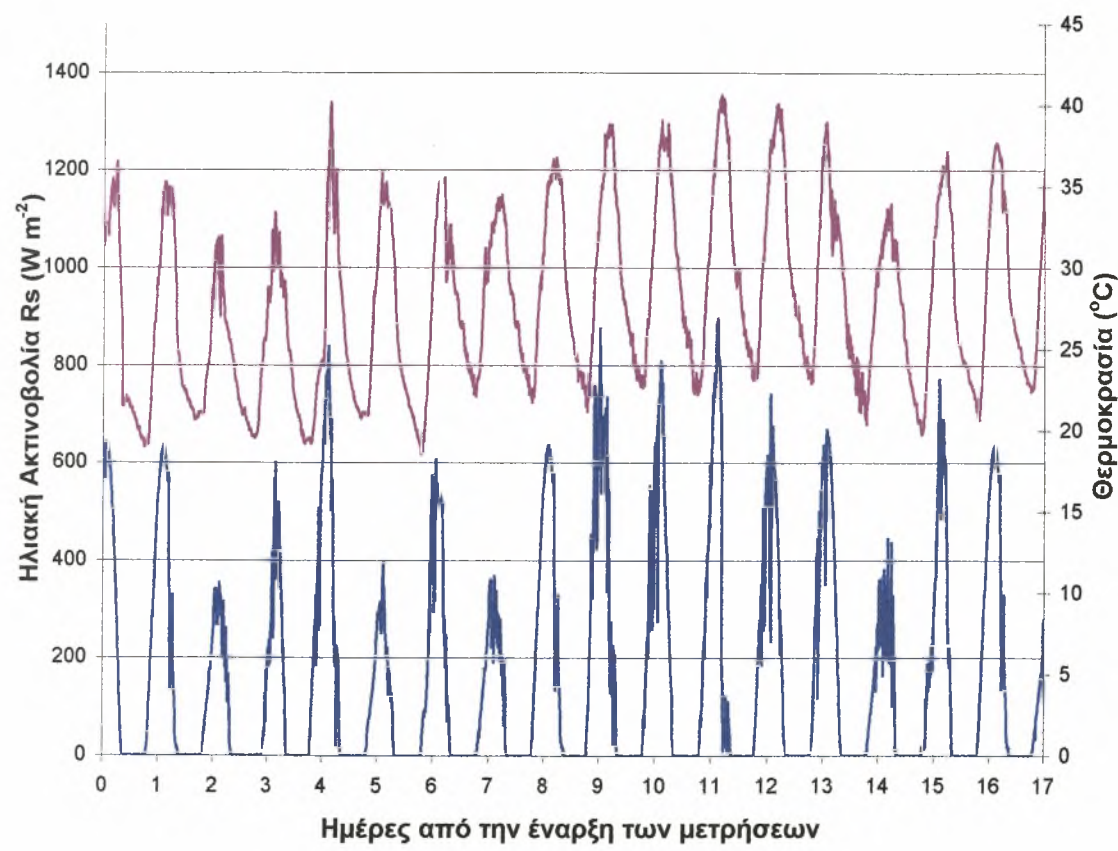
3.5 Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS (Έκδοση 10.0.7 Inc., Chicago, Illinois). Συγκεκριμένα με τη χρήση του υποπακέτου GLM (General Linear Model) έγινε μονοπαραγοντική ανάλυση παραλλακτικότητας (Univariate Analysis of Variance) για τη σύγκριση των μέσων όρων των επιπέδων των στοιχείων των μεταχειρίσεων (1,3 και 7 ημέρες σε έλλειψη και στη συνέχεια 1,3 και 7 ημέρες σε πλήρες διάλυμα) με τους μέσους όρους των επιπέδων των στοιχείων στα φυτά μάρτυρες. Επιπλέον για τη δεύτερη περίοδο των μετρήσεων έγινε σύγκριση των μέσων όρων του ξηρού βάρους των φυτών των επιμέρους μεταχειρίσεων και του ξηρού βάρους των φυτών μαρτύρων.

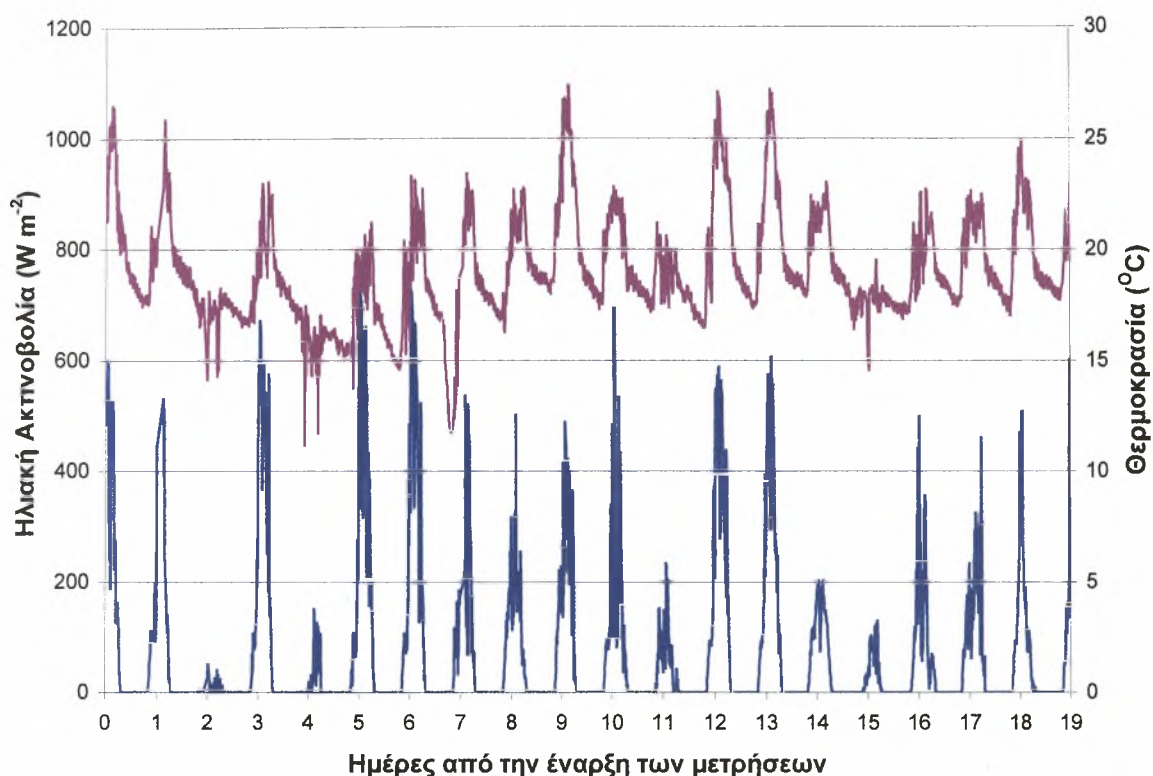
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Κλιματικοί παράγοντες

Στα Σχήματα 1 και 2 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας T (°C) και της ηλιακής ακτινοβολίας Rs (W m⁻²) ανά 10 min για τις περιόδους P1 και P2, αντίστοιχα.



Σχήμα 1. Μέσες τιμές της ηλιακής Ακτινοβολίας Rs (W m⁻²) (___) και της θερμοκρασίας T (°C) (___) ανά 10λεπτο, για την περίοδο P1.

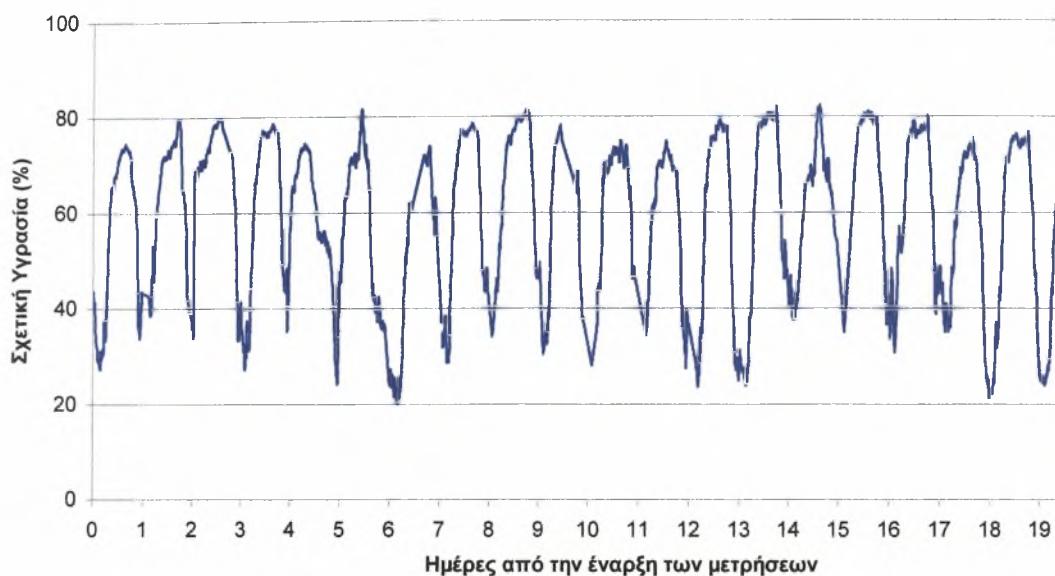


Σχήμα 2. Μέσες τιμές της ηλιακής Ακτινοβολίας R_s (W m^{-2}) (___) και της θερμοκρασίας T ($^{\circ}\text{C}$) (___) ανά 10λεπτο, για την περίοδο P2.

Στα Σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές ανά 10λεπτο της σχετικής υγρασίας HR (%) στο εσωτερικό του θερμοκηπίου, για τις περιόδους P1 και P2, αντίστοιχα.



Σχήμα 3. Μέσες τιμές ανά 10λεπτο σχετικής υγρασίας HR (%) για την περίοδο P1.

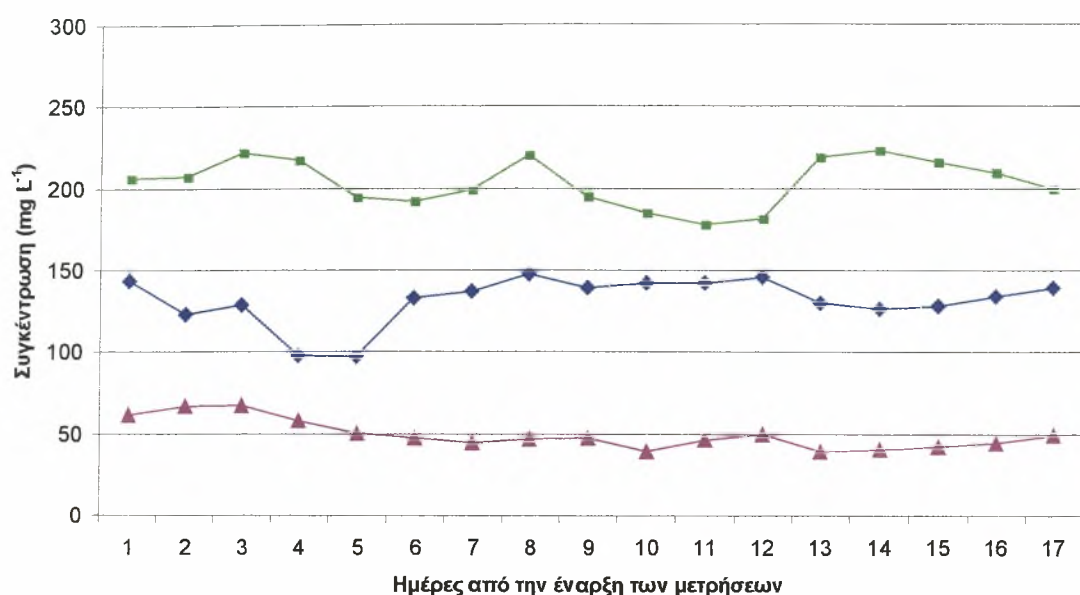


Σχήμα 4. Μέσες τιμές ανά 10λεπτο σχετικής υγρασίας HR (%) για την περίοδο P2.

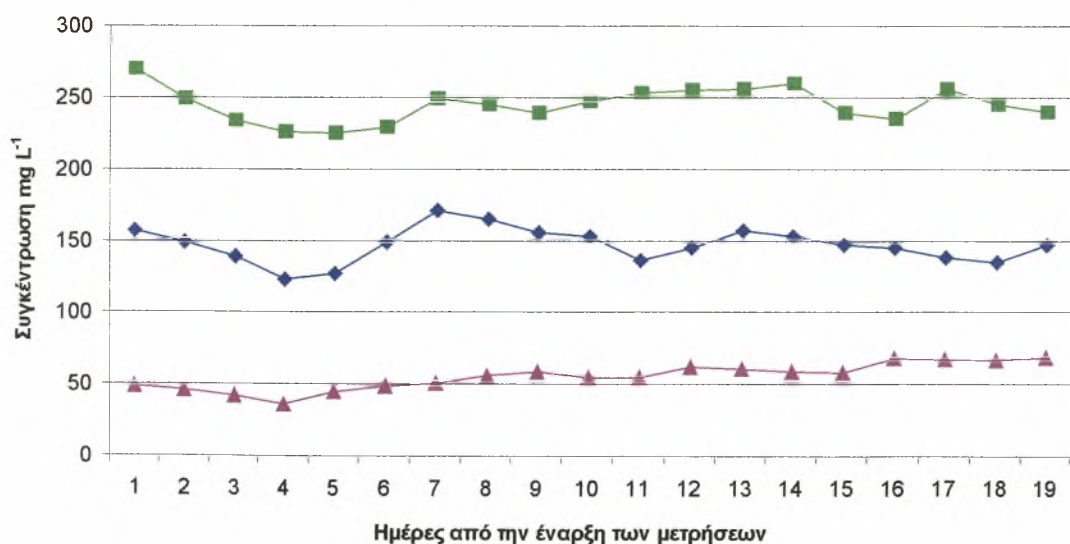
4.2 Συγκεντρώσεις Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} στα θρεπτικά διαλύματα

Στα Σχήματα 5 και 6 παρουσιάζονται οι συγκεντρώσεις (mg L^{-1}) των τριών κατιόντων (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+}) του θρεπτικού διαλύματος με το οποίο τροφοδοτήθηκαν τα φυτά μάρτυρες, για κάθε μέρα της περιόδου P1 και P2, αντίστοιχα. Οι συγκεντρώσεις και των τριών στοιχείων κυμαίνονται γύρω από τις βέλτιστες τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για την καλλιέργεια της τριανταφυλλιάς (Sonneveld, 1997).

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, η επιθυμητή συγκέντρωση Mg^{2+} στο θρεπτικό διάλυμα είναι 24 mg L^{-1} . Στα θρεπτικά διαλύματα που διατέθηκαν στα φυτά μάρτυρες, η συγκέντρωση του Mg^{2+} ήταν σχεδόν διπλάσια από την επιθυμητή (Σχήματα 5 και 6). Αυτό οφειλόταν στην υψηλή συγκέντρωση του Mg^{2+} στο νερό που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του θρεπτικού διαλύματος.



Σχήμα 5. Ημερήσιες τιμές των συγκεντρώσεων (mg L⁻¹) των τριών κατιόντων Ca²⁺ (◆), Mg²⁺ (▲), K⁺ (■) στο θρεπτικό διάλυμα, στο οποίο αναπτύσσονταν τα φυτά μάρτυρες για την περίοδο P1.



Σχήμα 6. Ημερήσιες τιμές των συγκεντρώσεων (mg L⁻¹) των τριών κατιόντων Ca²⁺ (◆), Mg²⁺ (▲), K⁺ (■) στο θρεπτικό διάλυμα, στο οποίο αναπτύσσονταν τα φυτά μάρτυρες για την περίοδο P2.

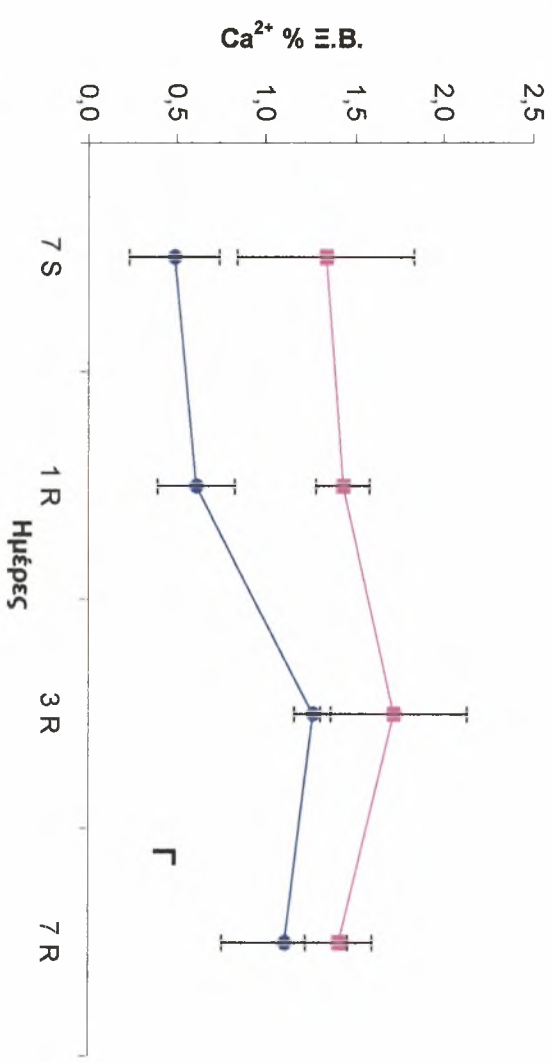
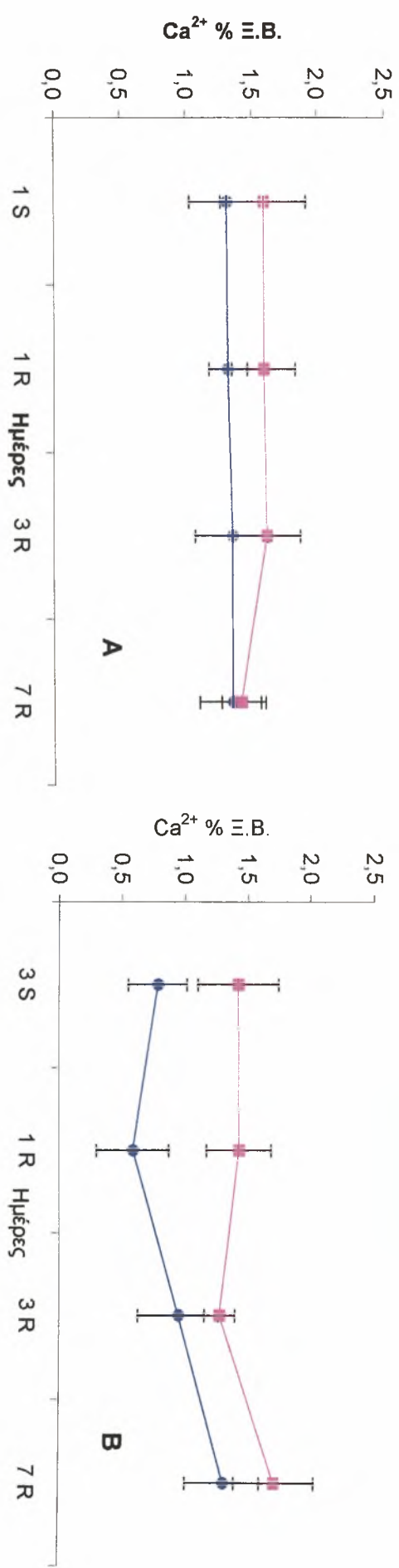
4.3 Συγκεντρώσεις Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ στα διάφορα φυτικά μέρη

4.3.1 Αποτελέσματα 1^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης Ca^{2+}

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή του Ca^{2+} (% Ξ.Β.) σε Φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Ca^{2+} στα φύλλα των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 1,4-1,5 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 7 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Ca^{2+} ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται κατά τις μεταχειρίσεις των 3 και 7 ημερών παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά το πέρασμα 3 ημερών παραμονής σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα.



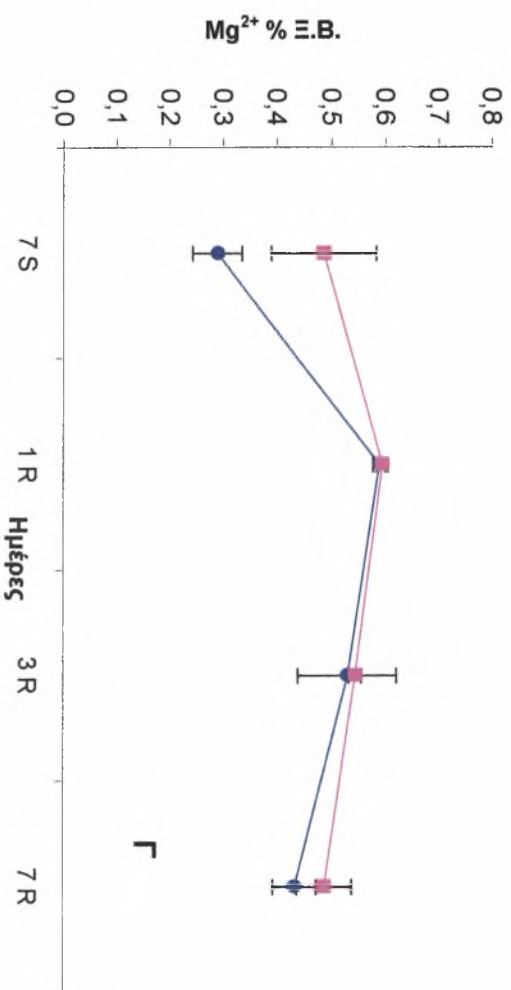
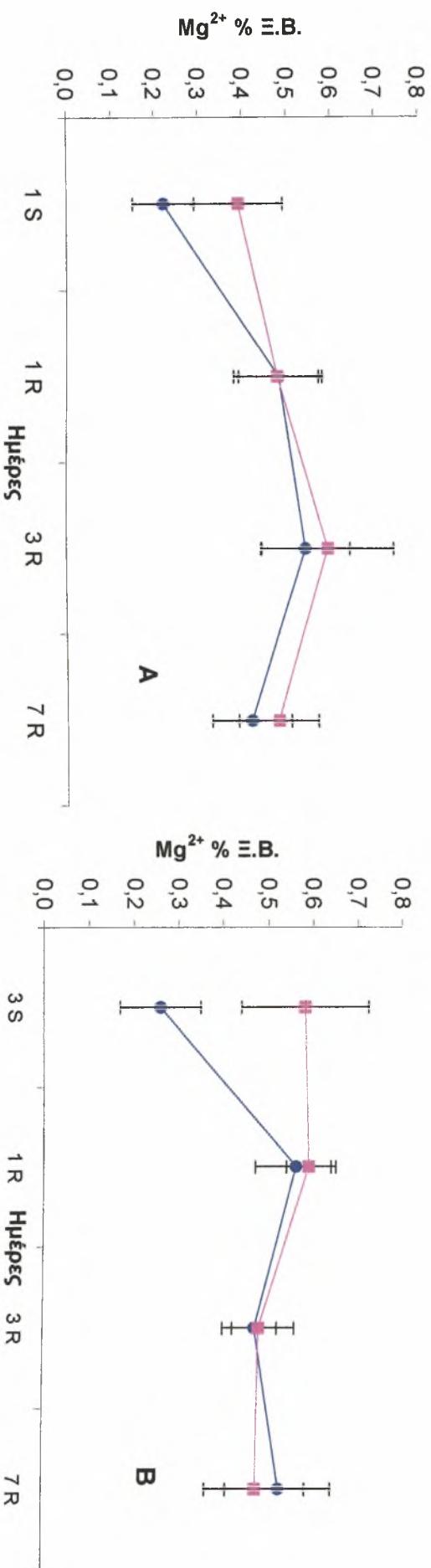
Σχήμα 7. Μεταβολή του Ca²⁺ (% \pm B.) σε φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

4.3.2 Αποτελέσματα 1^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης Mg²⁺

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η μεταβολή του Mg²⁺ (% Ξ.Β.) σε Φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Mg²⁺ στα φύλλα των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,35-0,55 % Ξ.Μ. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 8 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Mg²⁺ ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται κατά τις μεταχειρίσεις των 3 και 7 ημερών παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά το πέρας 1 ημέρας παραμονής σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα.



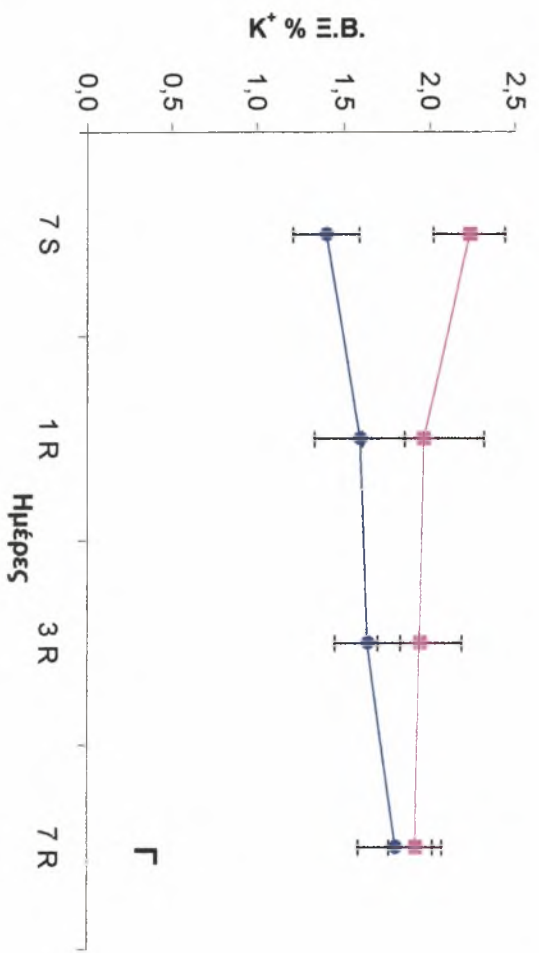
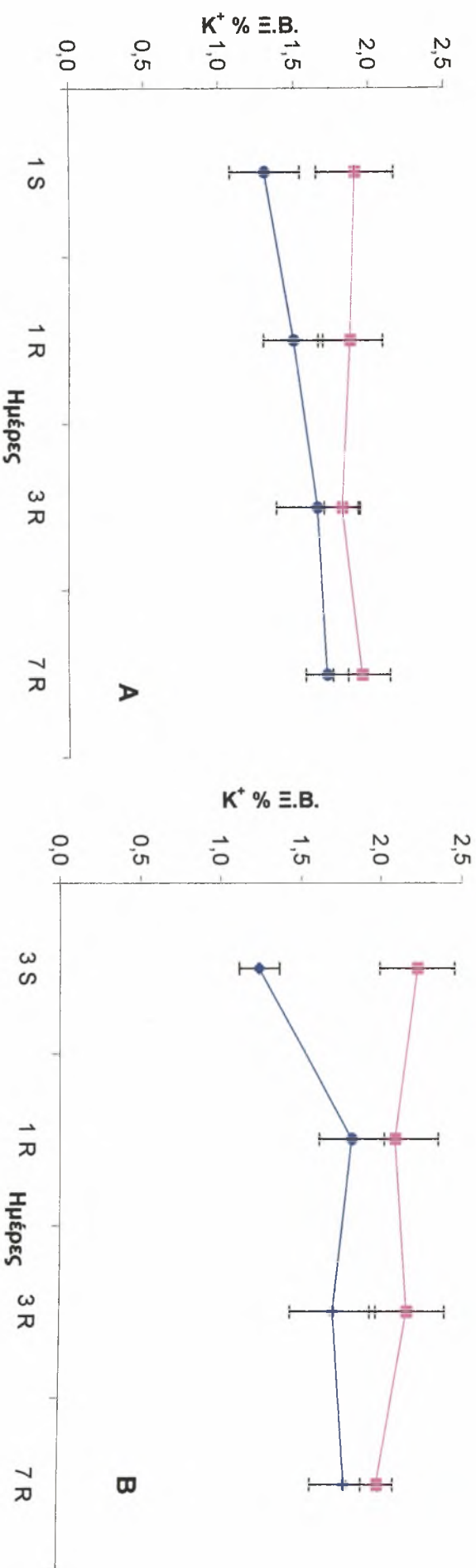
Σχήμα 8. Μεταβολή του Mg²⁺ (% \pm B.) σε φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (---●---) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (---■---).

4.3.3 Αποτελέσματα 1^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης K⁺

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η μεταβολή του K⁺ (% Ξ.Β.) σε Φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του K⁺ στα φύλλα των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 1,8-2,5 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 9 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα K⁺ ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται και στις τρεις μεταχειρίσεις (1, 3 και 7 ημέρες παραμονής σε συνθήκες έλλειψης), οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά το πέρας 1 ημέρας παραμονής σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα.



Σχήμα 9. Μεταβολή του K⁺ (% E.B.) σε φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

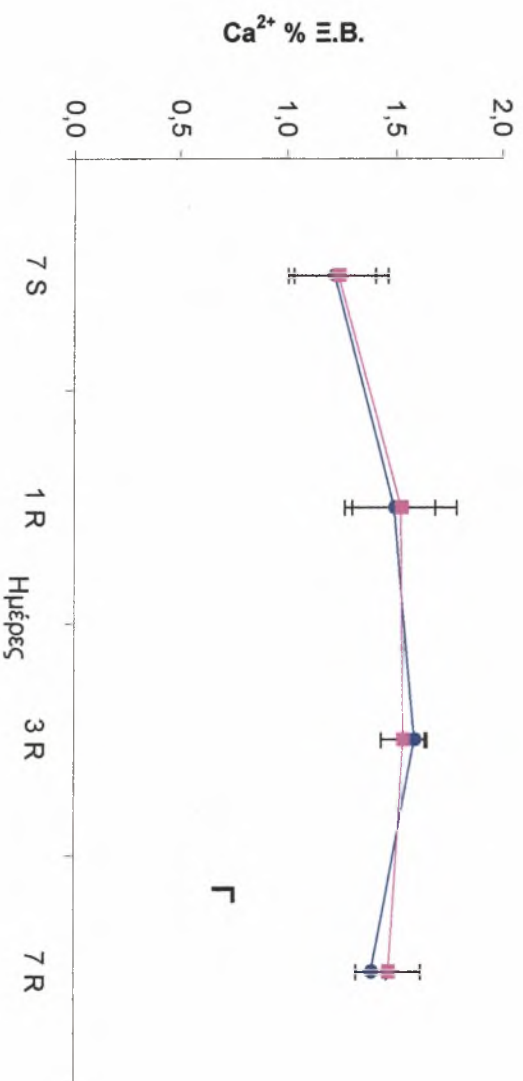
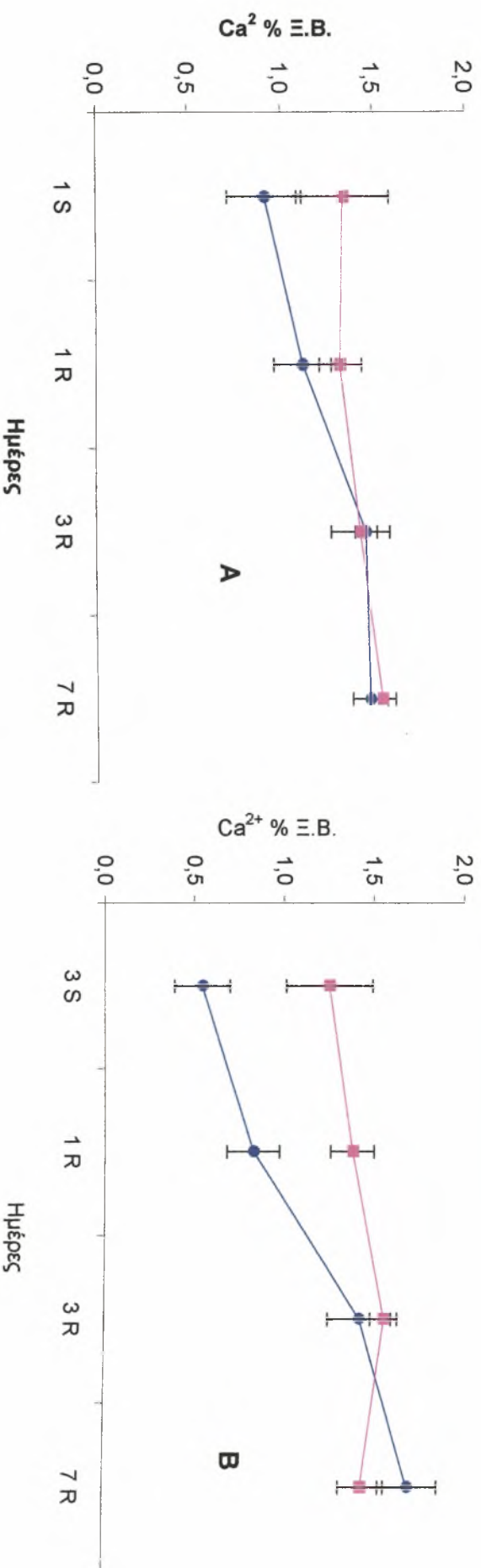
4.3.4 Αποτελέσματα 2^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης Ca²⁺

4.3.4.1 Φύλλα

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η μεταβολή του Ca²⁺ (% Ξ.Β.) σε Φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (-●-) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (-■-).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Ca²⁺ στα φύλλα των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 1,4-1,5 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 10 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Ca²⁺ ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται ύστερα από 3 ημέρες παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά από 1 ημέρα επανατροφοδότηση με πλήρες θρεπτικό διάλυμα.



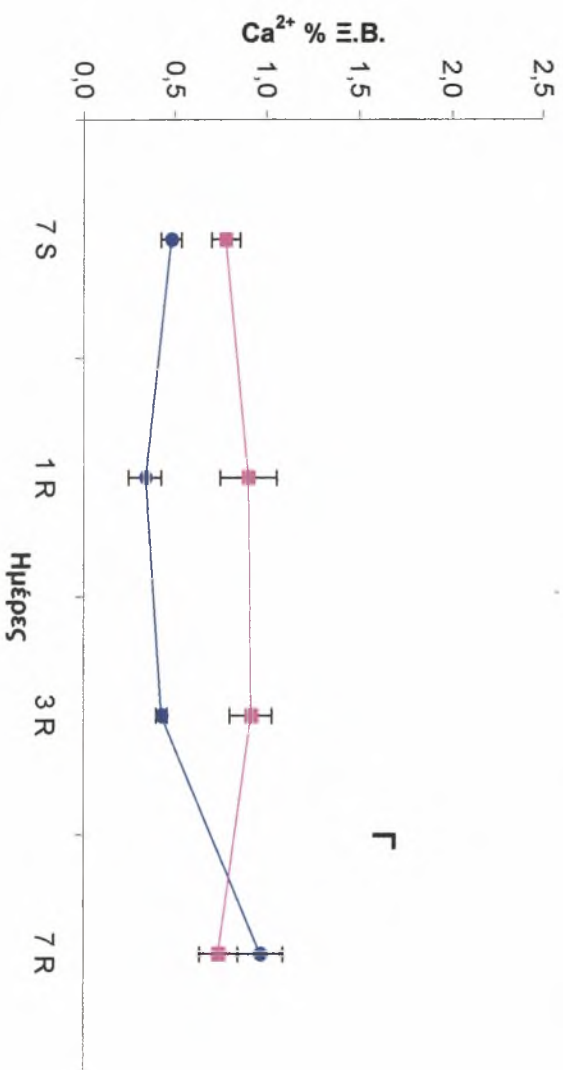
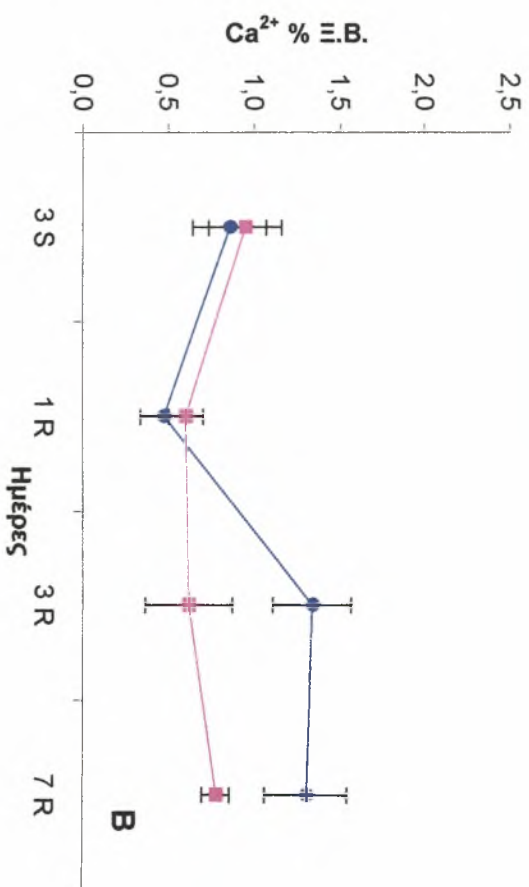
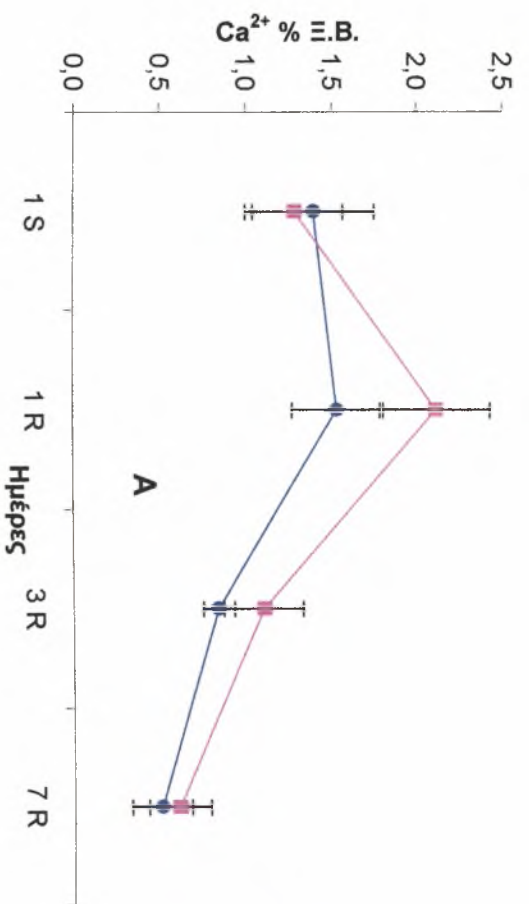
Σχήμα 10. Μεταβολή του Ca^{2+} (% Ξ.B.) σε φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

4.3.4.2 Άνθη

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται η μεταβολή του Ca^{2+} (% Ξ.Β.) σε Άνθη φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Ca^{2+} στα άνθη των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,3-1,5 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ.ά, 1999).

Από το Σχήμα 11 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Ca^{2+} ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται ύστερα από 7 ημέρες παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά από 7 ημέρες επανατροφοδότησης με πλήρες θρεπτικό διάλυμα. Η σχετική καθυστέρηση που παρατηρείται (7 ημέρες) οφείλεται στο γεγονός ότι το Ca^{2+} είναι δυσκίνητο στοιχείο και σε περιπτώσεις έλλειψης, σε όργανα που τροφοδοτούνται μέσω φλοιώματος και παρουσιάζουν μικρή διαπνοή όπως τα άνθη, τα επίπεδα του στοιχείου μειώνονται σε μεγάλο βαθμό (Bangerth, 1979, Kirkby κ.ά., 1984, Mengel και Kirkby, 1987). Επίσης για όσο χρονικό διάστημα διαρκούν οι συνθήκες έλλειψης το Ca^{2+} δε μπορεί να μετακινηθεί από τα φύλλα προς τα άνθη.



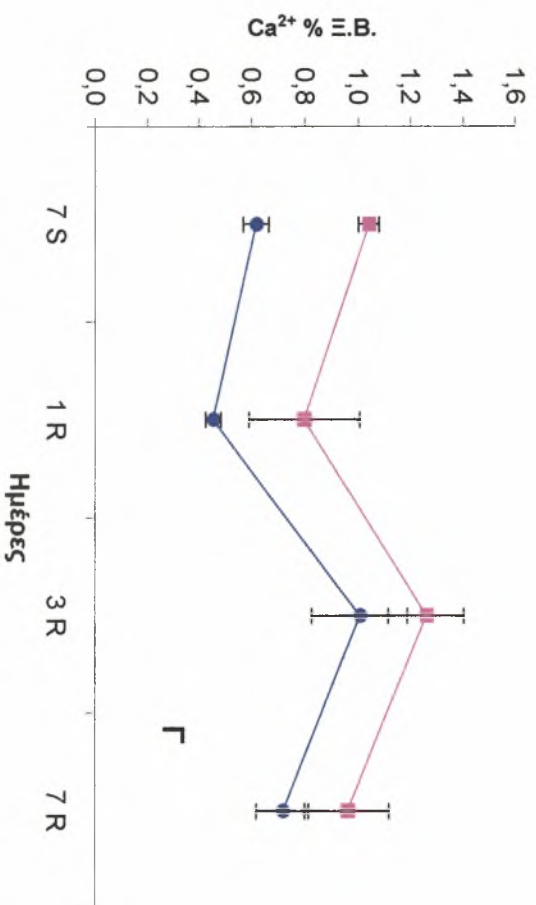
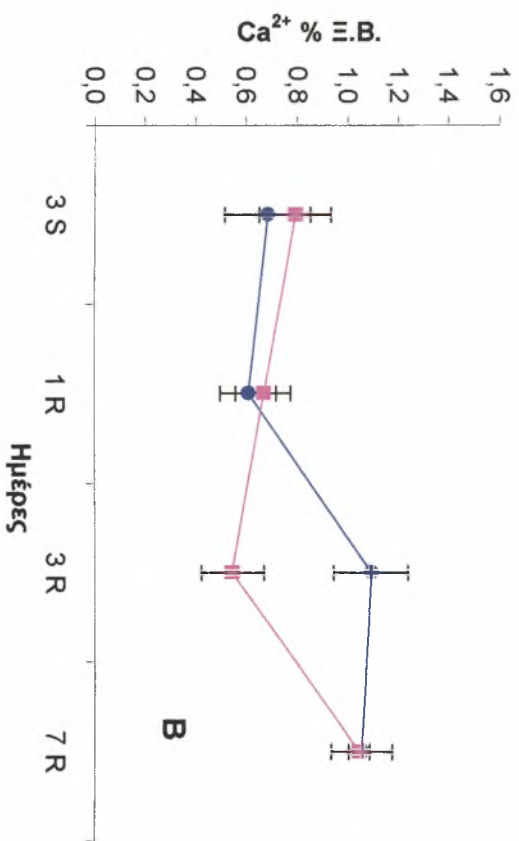
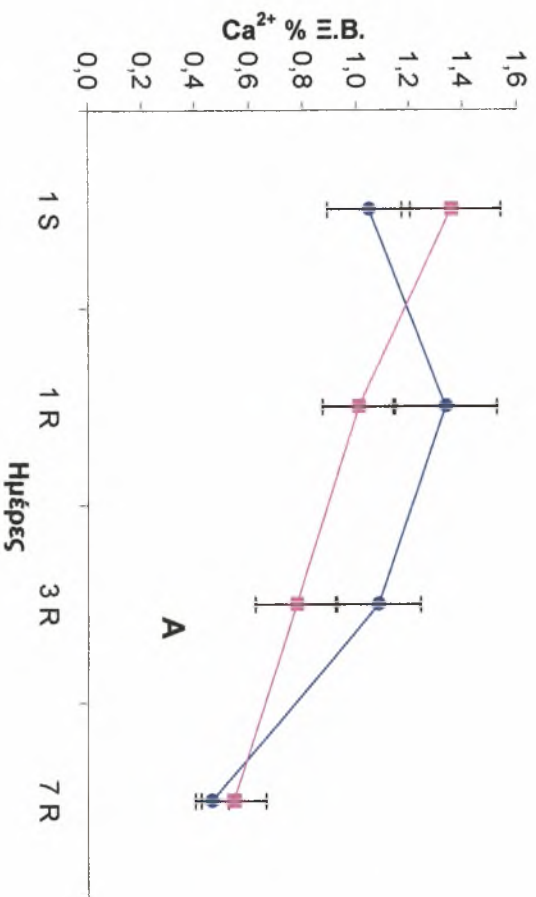
Σχήμα 11. Μεταβολή του Ca^{2+} (% \pm B.) σε Άνη φυτών που υπέστησαν έλδειψη (S) (---●---) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (---■---).

4.3.4.3 Βλαστοί

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται η μεταβολή του Ca^{2+} (% Ξ.Β.) σε Βλαστούς φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Ca^{2+} στους βλαστούς των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,3-1,0 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 12 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Ca^{2+} ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται ύστερα από 7 ημέρες παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά από 3 ημέρες επανατροφοδότησης με πλήρες θρεπτικό διάλυμα.



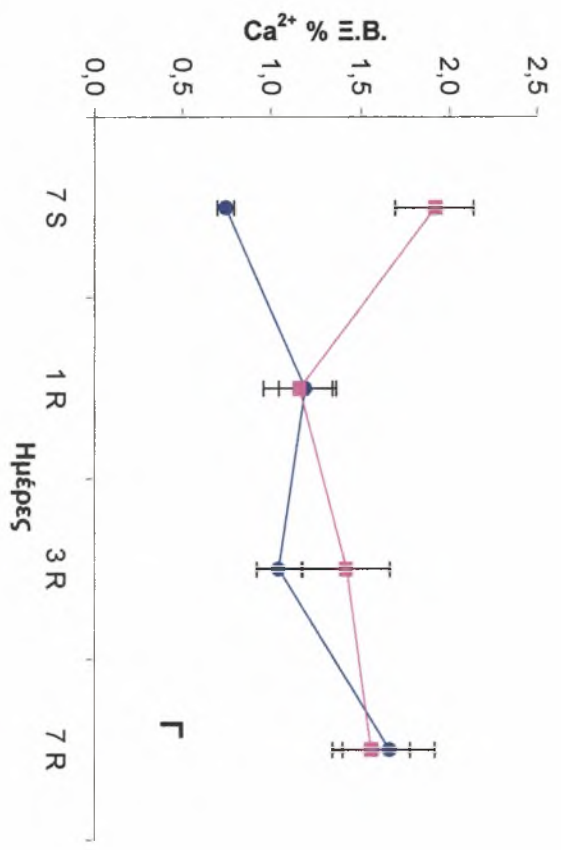
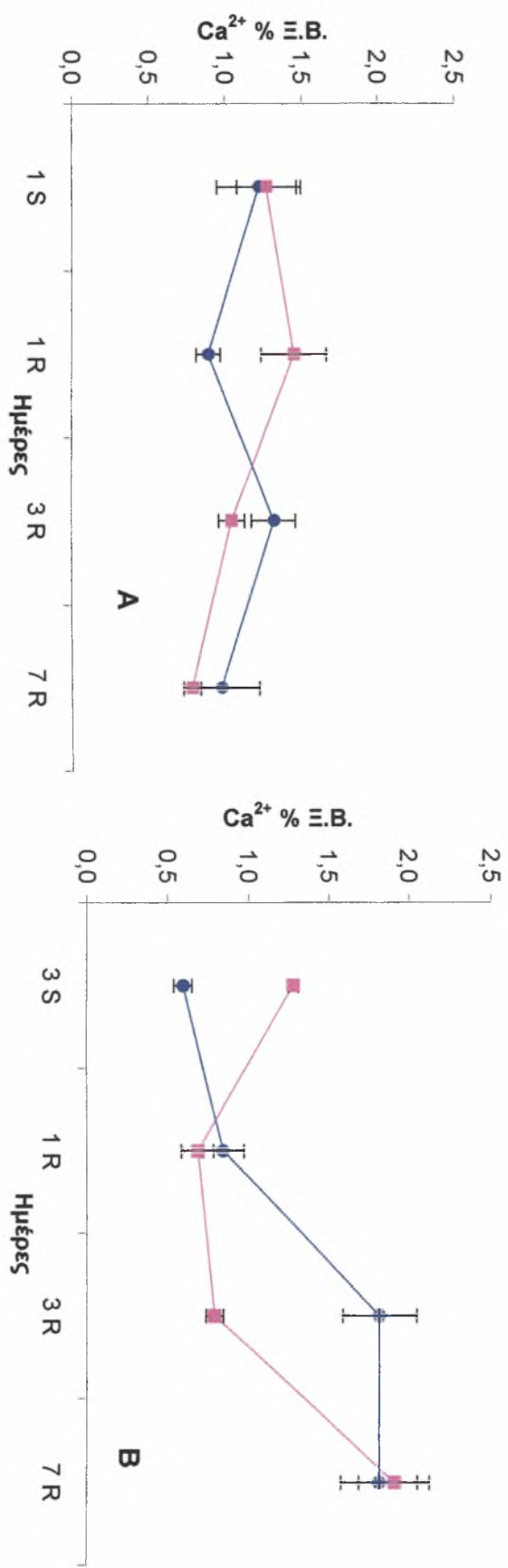
Σχήμα 12. Μεταβολή του Ca^{2+} (% Ξ .B.) σε βλαστούς φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

4.3.4.4 Ρίζες

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται η μεταβολή του Ca^{2+} (% Ξ.Β.) σε Ρίζες φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Ca^{2+} στις ρίζες των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,7-2,0 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 13 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Ca^{2+} ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται ύστερα από 3 και 7 ημέρες παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά από 1 ημέρα επανατροφοδότησης με πλήρες θρεπτικό διάλυμα. Στην περίπτωση της παραμονής για 3 ημέρες σε συνθήκες έλλειψης, παρατηρείται ότι μετά 3 ημέρες επανατροφοδότησης τα επίπεδα του στοιχείου υπερβαίνουν αυτά των φυτών μαρτύρων.



Σχήμα 13. Μεταβολή του Ca²⁺ (% Ξ.Β.) σε Ρίζες φυτών που υπέστησαν έλδειψη (S) (---●---) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (---■---).

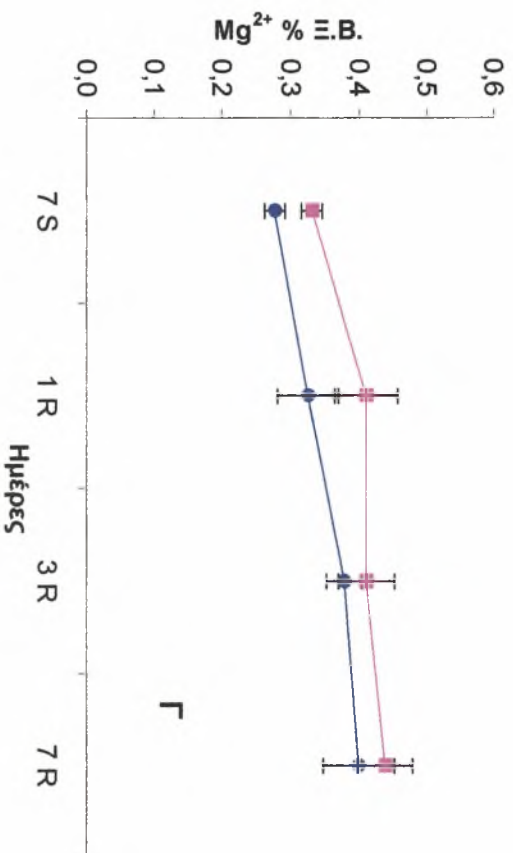
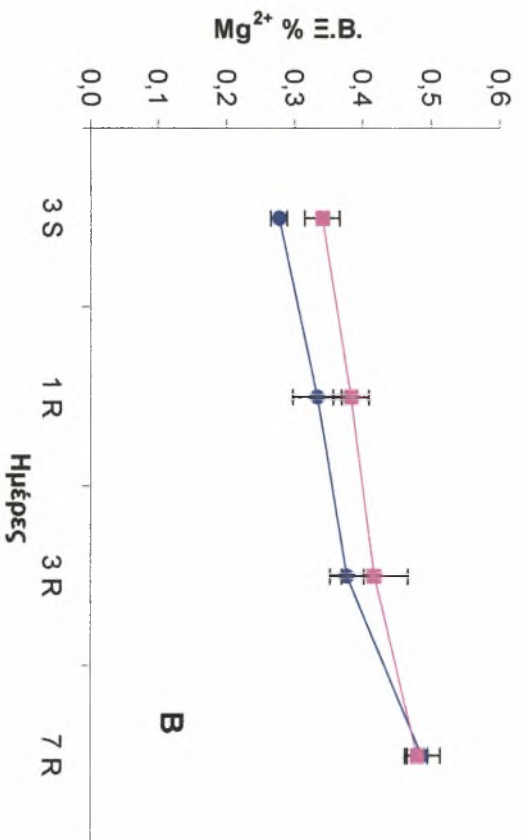
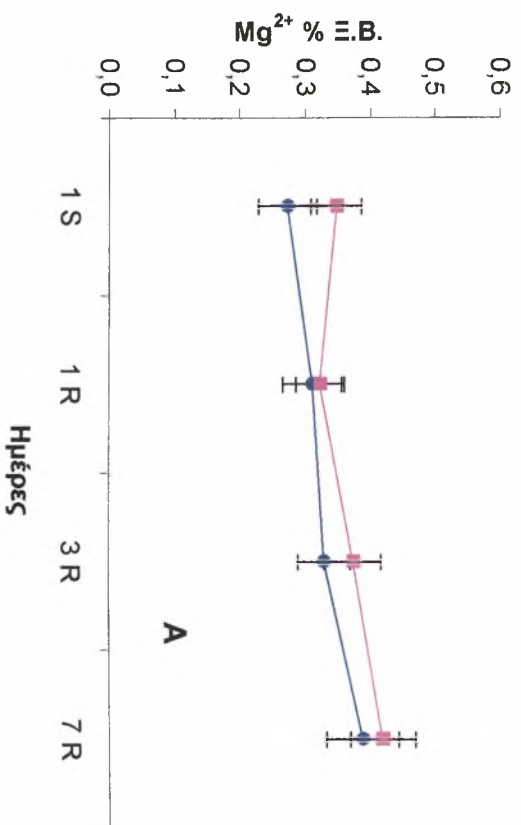
4.3.5 Αποτελέσματα 2^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης Mg²⁺

4.3.5.1 Φύλλα

Στο Σχήμα 14 παρουσιάζεται η μεταβολή του Mg²⁺ (% Ξ.Β.) σε Φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Mg²⁺ στα φύλλα των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,35-0,55 % Ξ.Μ. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Τόσο από το Σχήμα 14 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Mg²⁺ ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται κατά τις μεταχειρίσεις των 3 και 7 ημερών παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά το πέρασ 1 ημέρας παραμονής σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα.



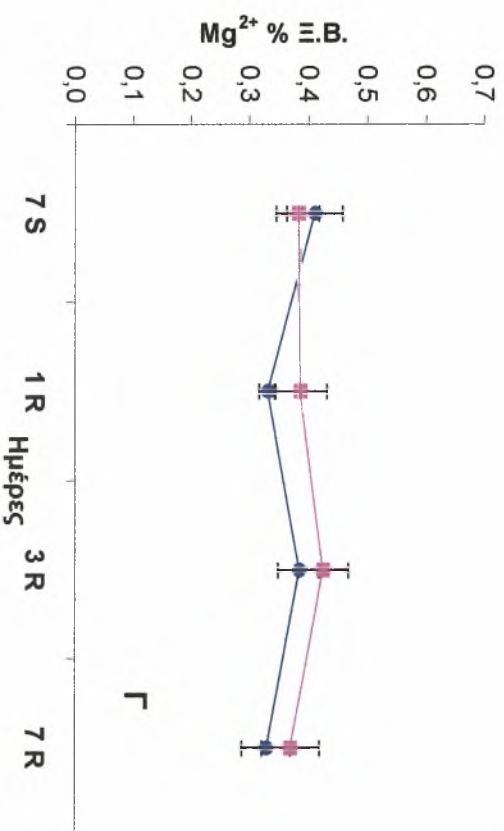
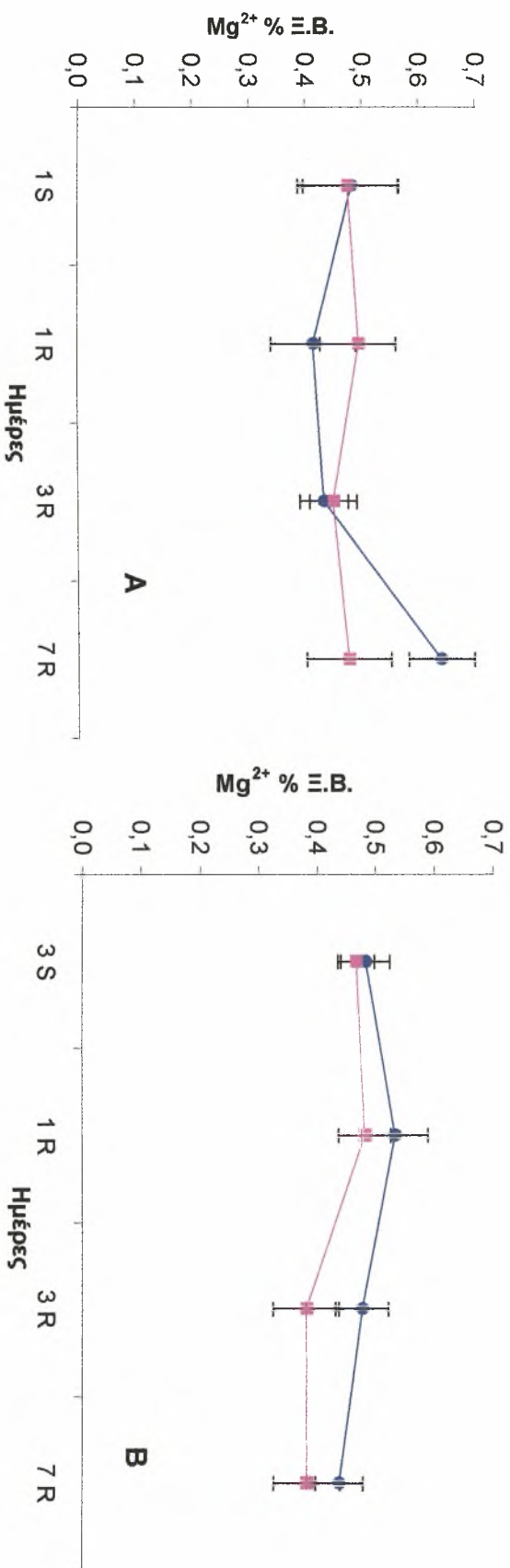
Σχήμα 14. Μεταβολή του Mg^{2+} (% $\equiv B.$) σε φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (---●---) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (---■---).

4.3.5.2 Άνθη

Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται η μεταβολή του Mg^{2+} (% Ξ.Β.) σε Άνθη φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Mg^{2+} στα άνθη των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,25-0,5 % Ξ.Μ. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Τόσο από το Σχήμα 15 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Mg^{2+} ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται μόνο ύστερα από 7 ημέρες επανατροφοδότησης, στη μεταχείριση με 1 ημέρα έκθεση σε έλλειψη. Στην περίπτωση αυτή τα φυτά που υφίστανται έλλειψη και επανατροφοδότηση παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές από τα φυτά μάρτυρες. Το γεγονός ότι δεν παρατηρούνται διαφορές σε καμία από τις μεταχειρίσεις με έλλειψη οφείλεται στο γεγονός ότι το Mg^{2+} είναι πολύ ευκίνητο στοιχείο στο φλοίωμα και μπορεί να μετακινηθεί εύκολα προς τα ανώτερα μέρη του φυτού (Mengel και Kirkby, 1987).



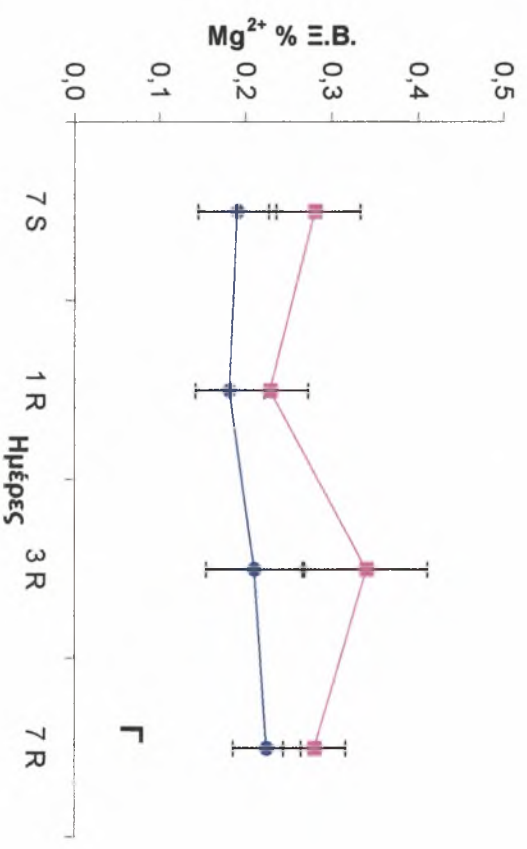
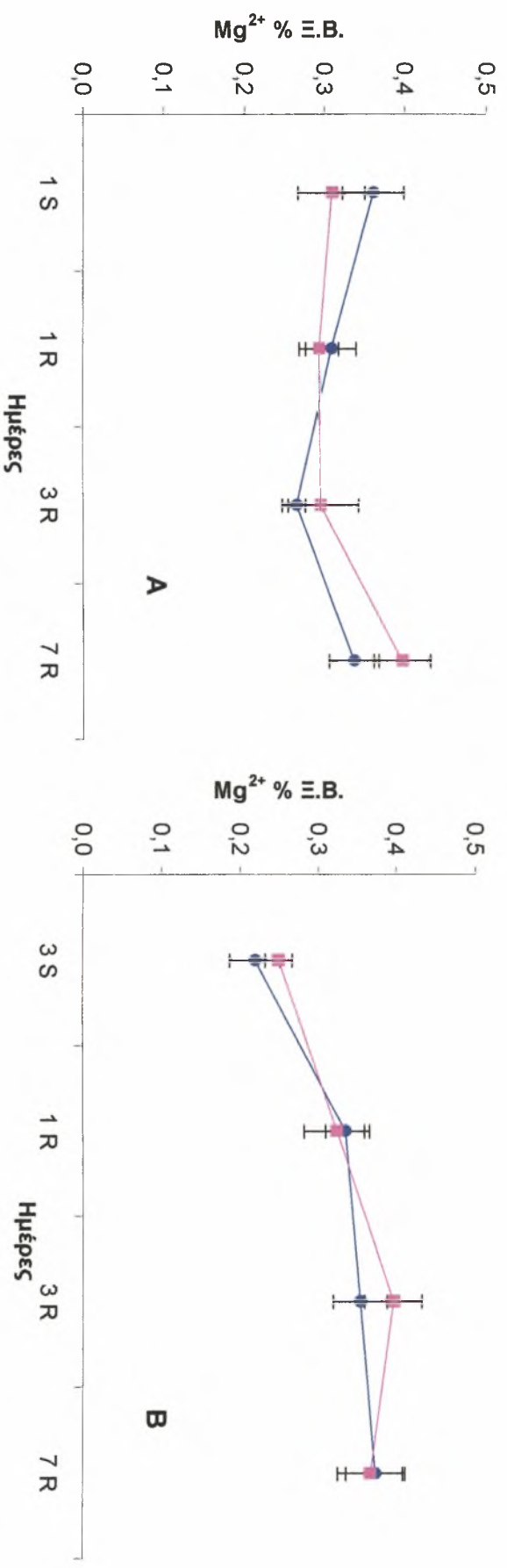
Σχήμα 15. Μεταβολή του Mg^{2+} (% Ξ.Β.) σε Άνη φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (---●---) για 1 (Α), 3 (Β) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (---■---).

4.3.5.3 Βλαστοί

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζεται η μεταβολή του Mg^{2+} (% Ξ.Β.) σε Βλαστούς φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Mg^{2+} στους βλαστούς των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,25-0,4 % Ξ.Μ. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 16 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Mg^{2+} ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, δεν παρατηρούνται σε καμία από τις μεταχειρίσεις με έλλειψη.



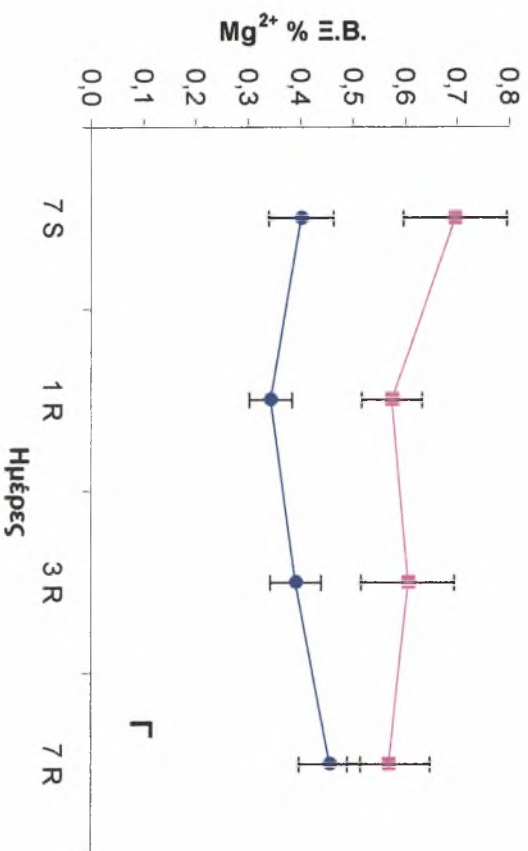
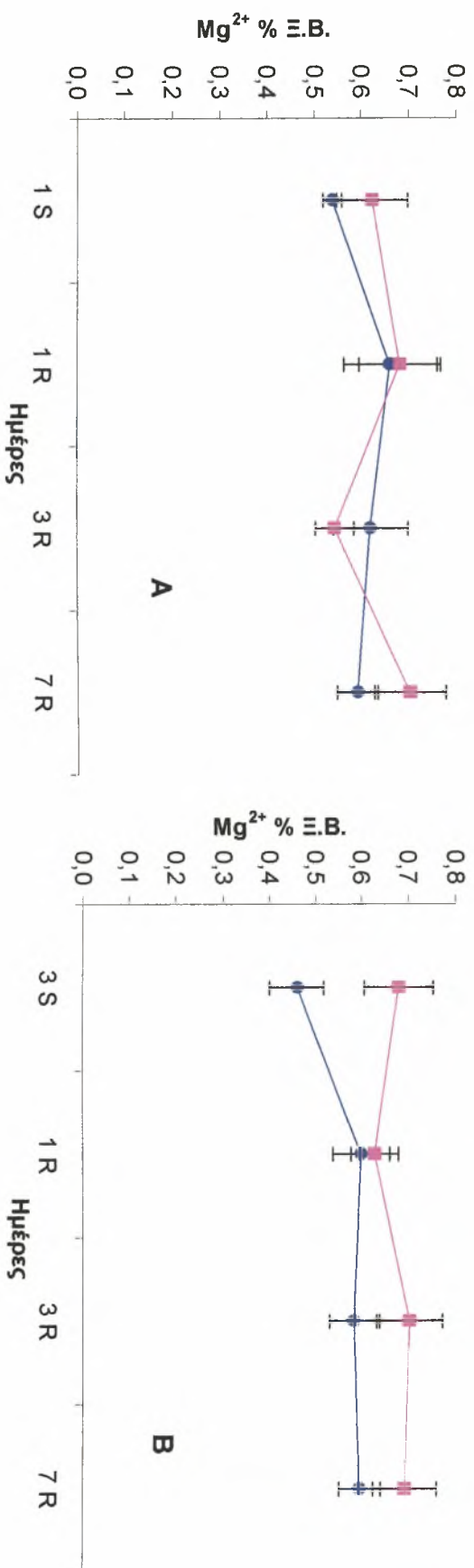
Σχήμα 16. Μεταβολή του Mg^{2+} (% $\Xi.B.$) σε βλαστούς φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

4.3.5.4 Ρίζες

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζεται η μεταβολή του Mg^{2+} (% Ξ.Β.) σε Ρίζες φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του Mg^{2+} στις ρίζες των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,55-0,7 % Ξ.Μ. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 17 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα Mg^{2+} ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται κατά τις μεταχειρίσεις των 3 και 7 ημερών παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά το πέρας 1 ημέρας και 7 ημερών παραμονής σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα, αντιστοίχως.



Σχήμα 17. Μεταβολή του Mg^{2+} (% $\equiv B.$) σε Ριζές φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (---●---) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (---■---).

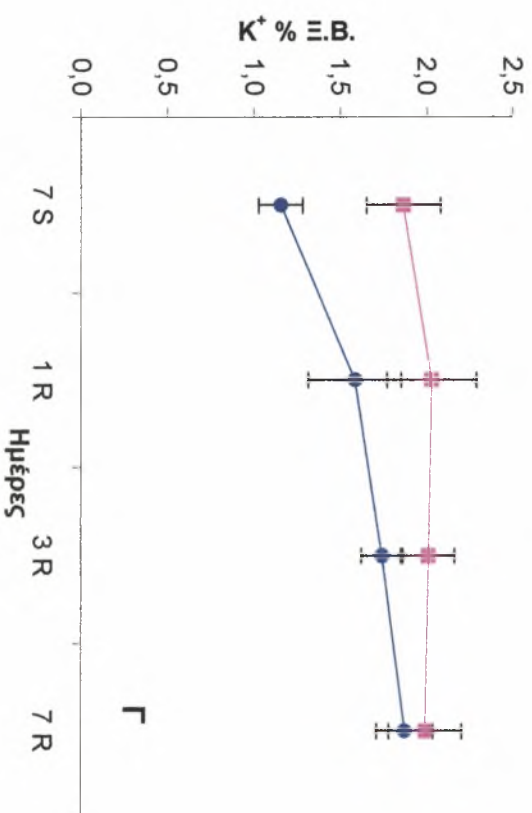
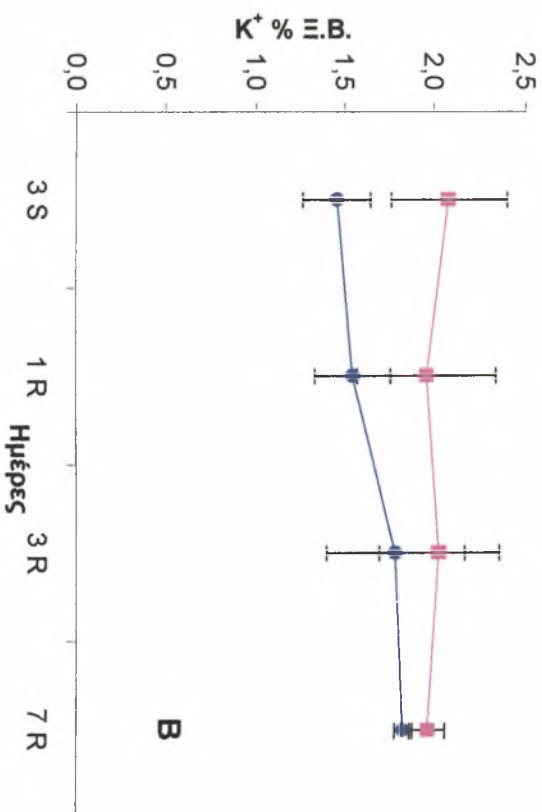
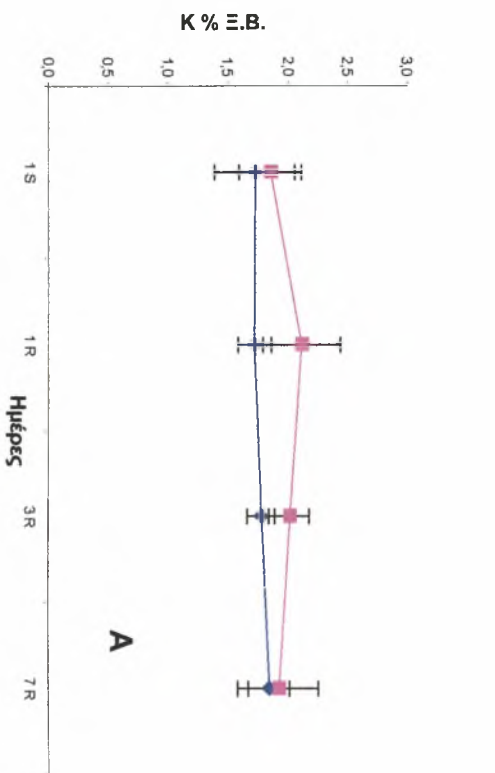
4.3.6 Αποτελέσματα 2^{ης} περιόδου πειράματος-Συνθήκες έλλειψης K⁺

4.3.6.1 Φύλλα

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται η μεταβολή του K⁺ (% Ξ.Β.) σε Φύλλα φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (-●-) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (-■-).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του K⁺ στα φύλλα των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 1,8-2,5 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 18 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα K⁺ ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται κατά τις μεταχειρίσεις των 3 και 7 ημερών παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά το πέρας 1 ημέρας παραμονής σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα.



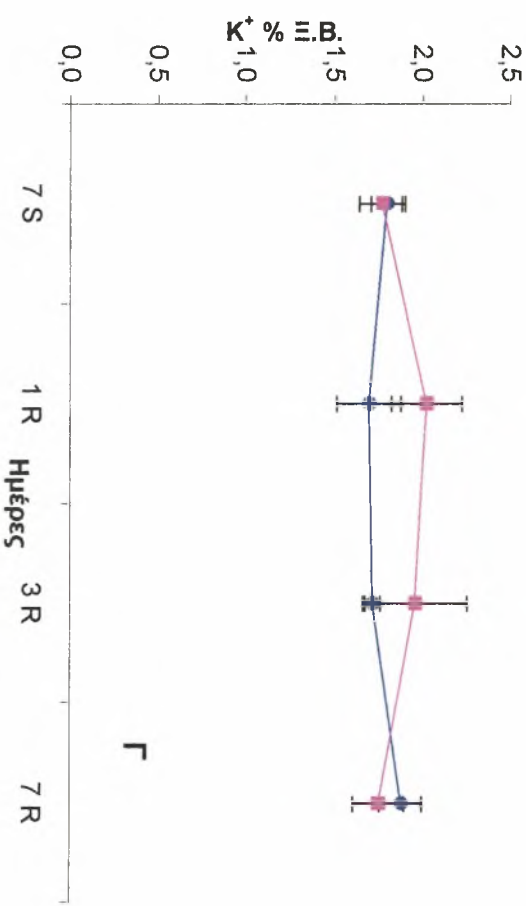
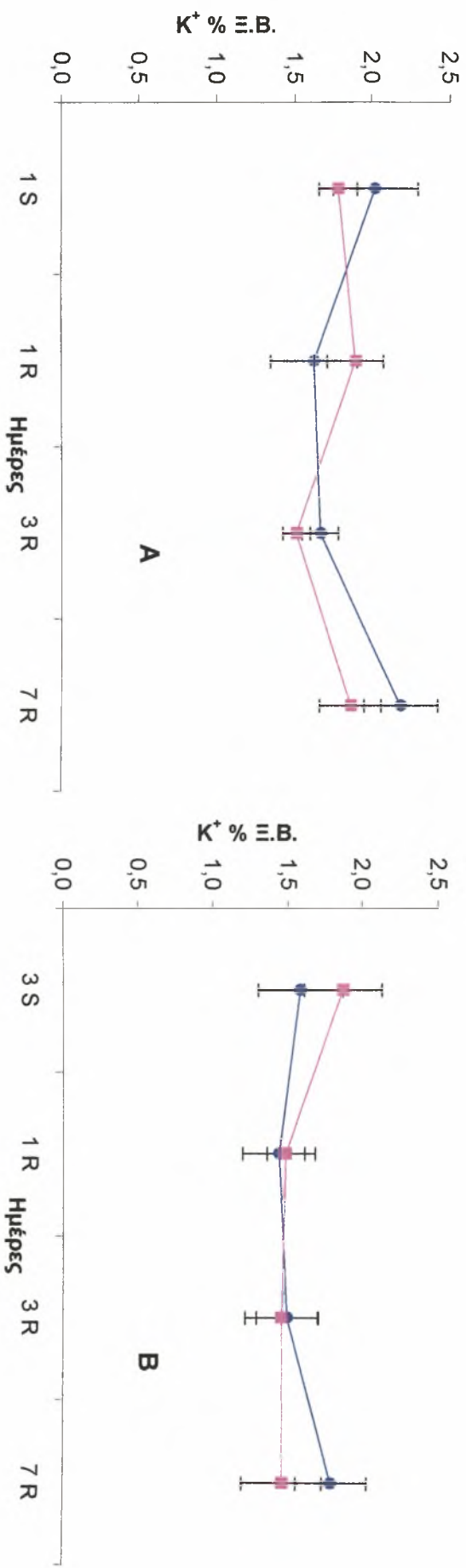
Σχήμα 18. Μεταβολή του K^+ (% E.B.) σε φύλλα φυτών που υπέστησαν έλθειψη (S) (---●---) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (---■---).

4.3.6.2 Άνθη

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται η μεταβολή του K^+ (% Ξ.Β.) σε Άνθη φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του K^+ στα άνθη των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 1,8-2,5 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 19 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα K^+ ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, δεν παρατηρούνται σε καμία από τις μεταχειρίσεις με έλλειψη.



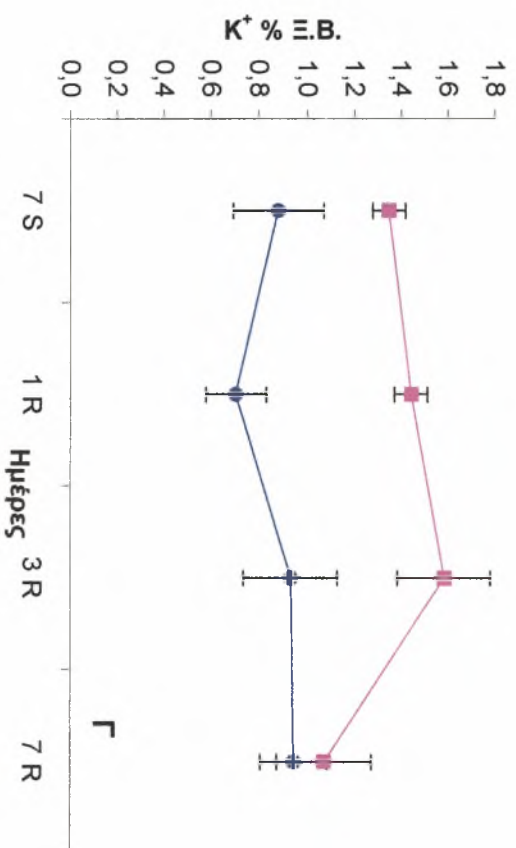
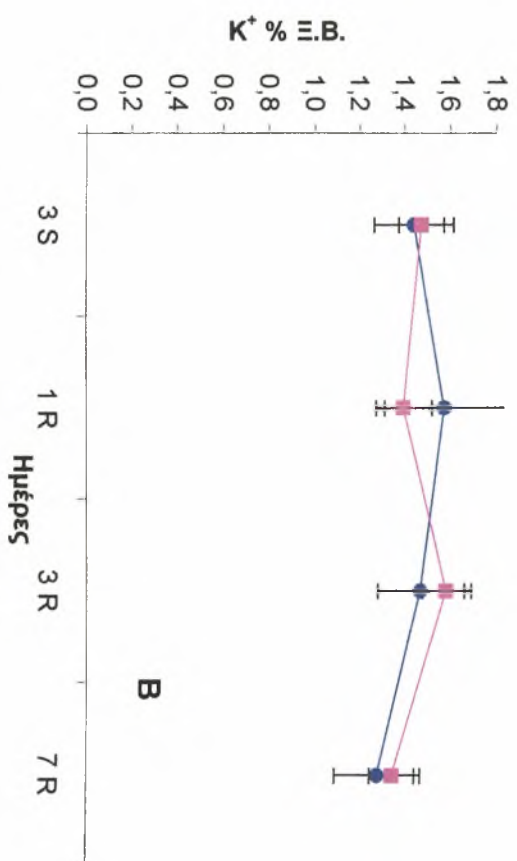
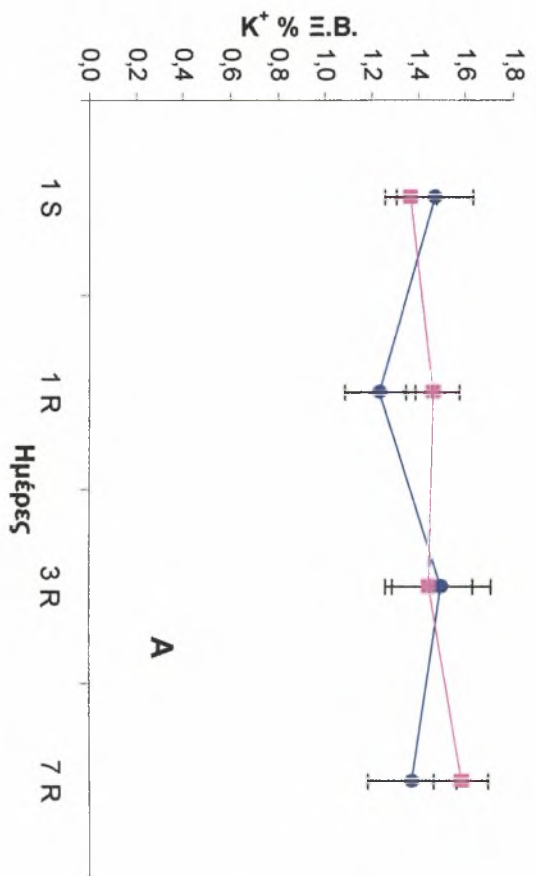
Σχήμα 19. Μεταβολή του K^+ (% Ξ.Β.) σε Άνθη φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

4.3.6.3 Βλαστοί

Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται η μεταβολή του K^+ (% Ξ.Β.) σε Βλαστούς φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του K^+ στους βλαστούς των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 0,9-1,5 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 20 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα K^+ ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται κατά τη μεταχείριση των 7 ημερών παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά το πέρας 7 ημερών παραμονής σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα.



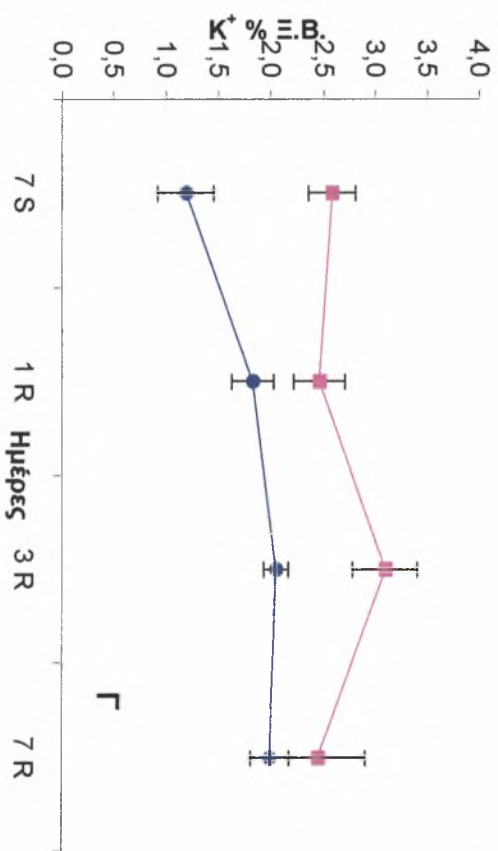
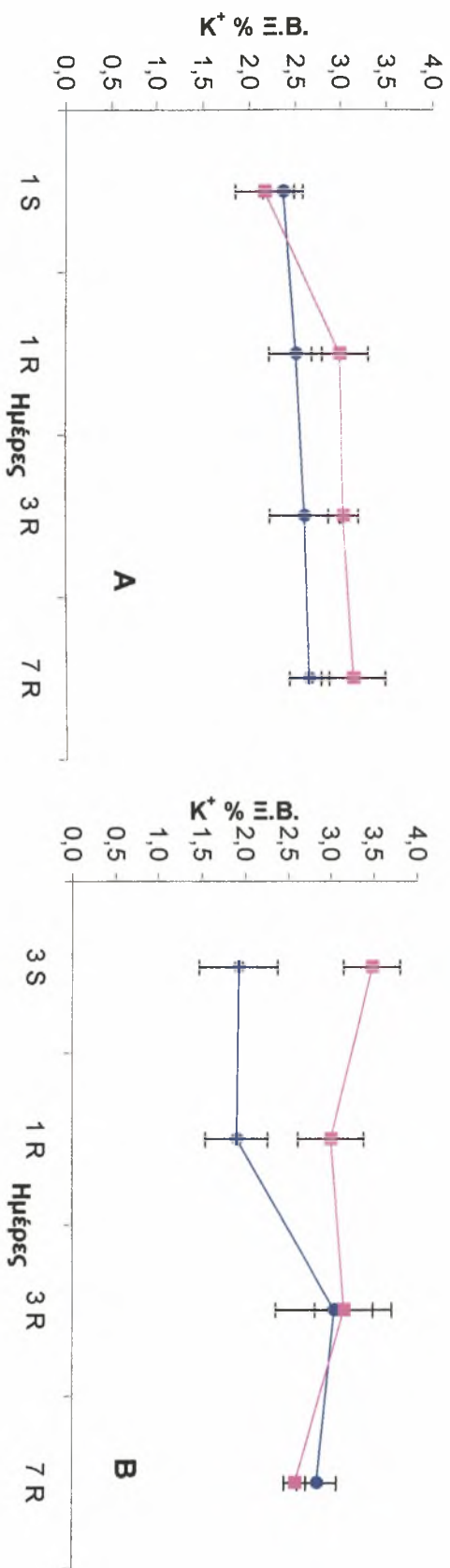
Σχήμα 20. Μεταβολή του K^+ (% $\Xi.B.$) σε Βλαστούς φυτών που υπέστησαν έλθειψη (S) (●) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

4.3.6.4 Ρίζες

Στο Σχήμα 21 παρουσιάζεται η μεταβολή του K^+ (% Ξ.Β.) σε Βλαστούς φυτών που υπέστησαν έλλειψη (S) (●) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (■).

Τα επίπεδα των συγκεντρώσεων του K^+ στις ρίζες των φυτών με κανονική θρέψη κυμαίνονται κοντά στα βέλτιστα επίπεδα: 1,8-3,5 % Ξ.Β. (White, 1987, Tamini κ ά, 1999).

Από το Σχήμα 21 φαίνεται ότι τα φυτά τριανταφυλλιάς, είναι σε θέση να ανακτήσουν τα βέλτιστα επίπεδα K^+ ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ φυτών μεταχείρισης και σε φυτά μάρτυρες, παρουσιάζονται κατά τις μεταχειρίσεις των 3 και 7 ημερών παραμονής σε συνθήκες έλλειψης, οι οποίες όμως παύουν να υφίστανται μετά το πέρας 3 και 7 ημερών παραμονής σε πλήρες θρεπτικό διάλυμα, αντίστοιχα.

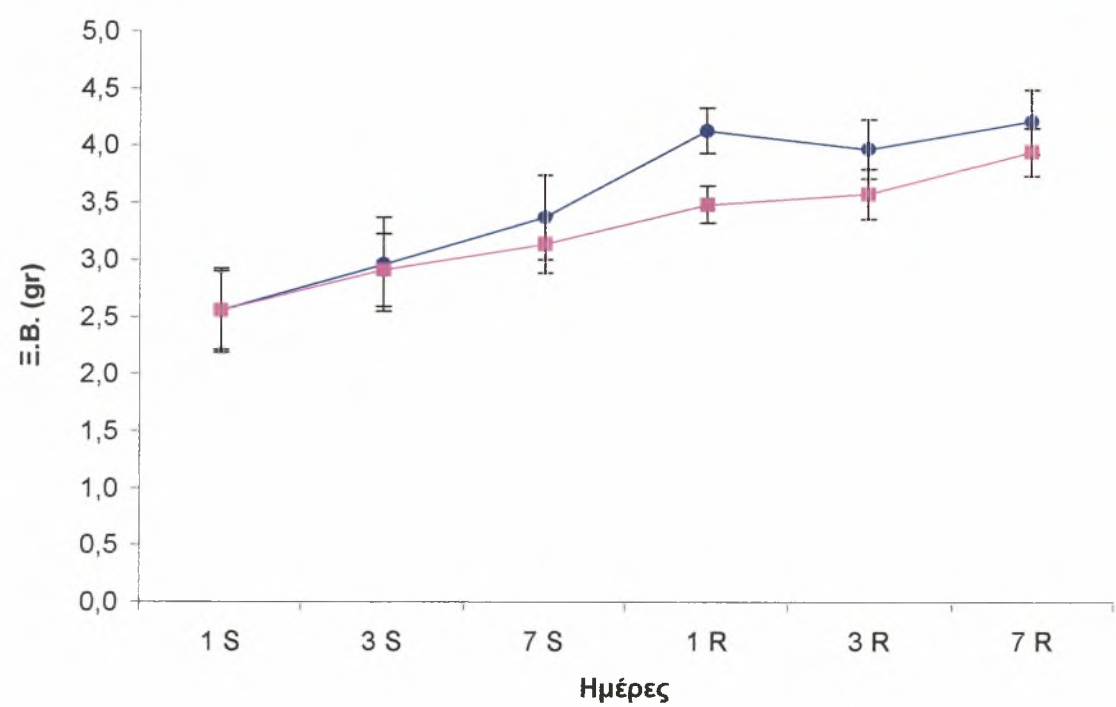


Σχήμα 21. Μεταβολή του K⁺ (% Ξ .B.) σε Ρίζες φυτών που υπέστησαν έλδειψη (S) (—●—) για 1 (A), 3 (B) και 7 (Γ) ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

4.4 Μεταβολές Ξηρού Βάρους

Μεταβολή του Ξ.Β φυτών που υπέστησαν έλλειψη Ca^{2+}

Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται η μεταβολή του ολικού Ξ.Β. (gr) σε φυτά που υπέστησαν έλλειψη Ca^{2+} (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).



Σχήμα 22. Μεταβολή ολικού Ξ.Β. σε φυτά που υπέστησαν έλλειψη Ca^{2+} (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

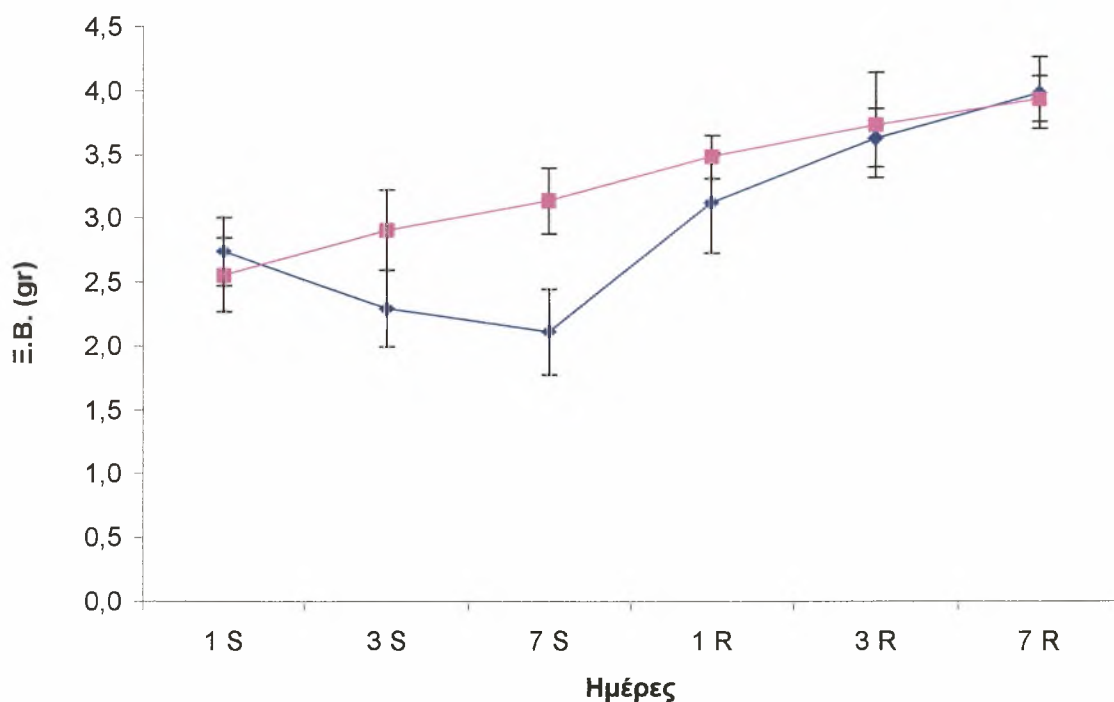
Από τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι:

- Δεν παρατηρείται καμία διαφορά στην παραγωγή Ξ.Β. κατά τη διάρκεια της έλλειψης
- Στατιστικώς σημαντικές διαφορές έχουμε μετά από 1 ημέρα επανατροφοδότησης με πλήρες διάλυμα και μάλιστα τα φυτά που υπέστησαν έλλειψη έχουν υψηλότερες τιμές Ξ.Β. από τα φυτά μάρτυρες

Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με παρόμοιες παρατηρήσεις για νεαρά φυτά καλλιέργειας τομάτας, τα οποία υπέστησαν έλλειψη Ca^{2+} για 5 ημέρες και επανατροφοδότηση (Morard κ.ά., 1996).

Μεταβολή του Ξ.Β φυτών που υπέστησαν έλλειψη Mg^{2+}

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται η μεταβολή του ολικού Ξ.Β. (gr) σε φυτά που υπέστησαν έλλειψη Mg^{2+} (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

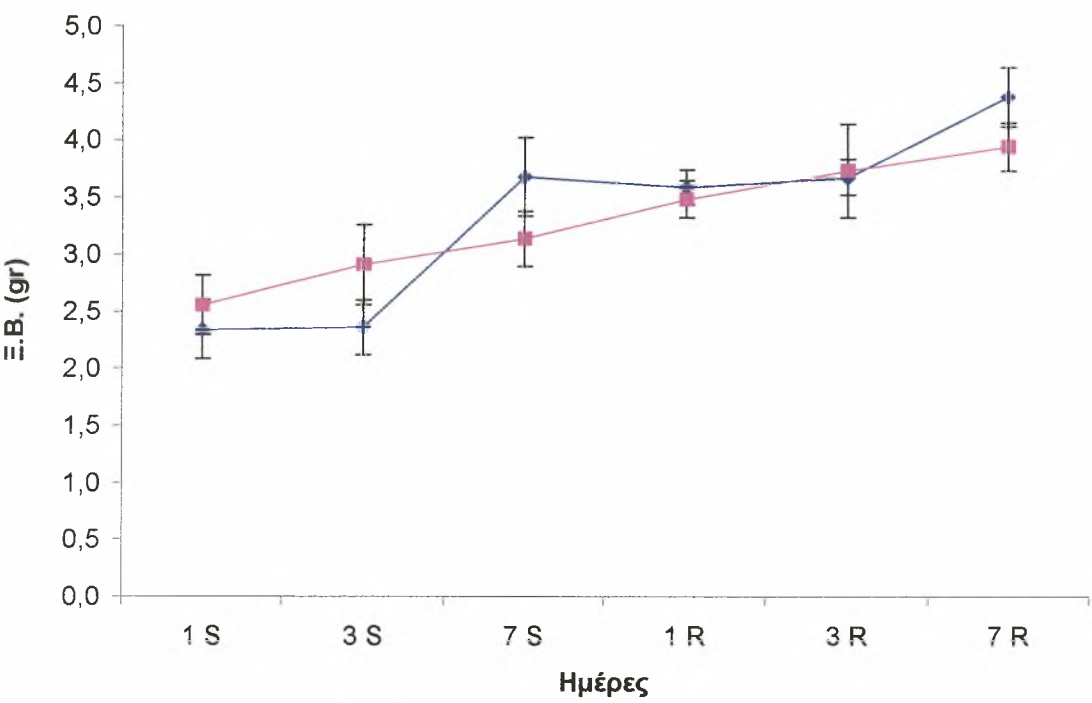


Σχήμα 23. Μεταβολή ολικού Ξ.Β. σε φυτά που υπέστησαν έλλειψη Mg^{2+} (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

Από το Σχήμα 23, παρατηρούμε ότι εμφανίζονται διαφορές στην παραγωγή βιομάζας όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες, οι οποίες να παύουν να υφίστανται μετά από 1 ημέρα επανατροφοδότησης με πλήρες διάλυμα.

Μεταβολή του Ξ.Β φυτών που υπέστησαν έλλειψη K⁺

Στο Σχήμα 24 παρουσιάζεται η μεταβολή του ολικού Ξ.Β. (gr) σε φυτά που υπέστησαν έλλειψη K⁺ (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).



Σχήμα 24. Μεταβολή ολικού Ξ.Β. σε φυτά που υπέστησαν έλλειψη K⁺ (S) (—●—) για 1, 3 και 7 ημέρες και στη συνέχεια επανατροφοδότηση (R) για τα ίδια χρονικά διαστήματα και σε φυτά μάρτυρες (—■—).

Από το Σχήμα 24, καθίσταται σαφές ότι δεν παρατηρούνται διαφορές στην παραγωγή βιομάζας ακόμα και όταν έχει προηγηθεί χρονικό διάστημα παραμονής αυτών σε συνθήκες έλλειψης επί 7 συνεχόμενες ημέρες. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με παρόμοιες παρατηρήσεις για νεαρά φυτά καλλιέργειας τομάτας, τα οποία υπέστησαν έλλειψη για 7 ημέρες και επανατροφοδότηση (Pujos και Morard, 1997).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1 Επίδραση της έλλειψης Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ στην περιεκτικότητα των διαφόρων φυτικών μερών στα παραπάνω θρεπτικά στοιχεία

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προκύπτει ότι φυτά τριανταφυλλιάς ανεπτυγμένα σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, τα οποία εκτέθηκαν σε συνθήκες έλλειψης Ca^{2+} , Mg^{2+} και K^+ για 7 ημέρες, δεν παρουσιάζουν σημαντικές αλλαγές στα επίπεδα αυτών των κατιόντων στα φύλλα, στους βλαστούς, στα άνθη και τις ρίζες.

Οι αυξομειώσεις που παρατηρούνται στα επίπεδα και των τριών στοιχείων στα φυτά μάρτυρες, κατά την περίοδο των μετρήσεων, οφείλονται σε επιδράσεις των κλιματικών παραγόντων που επικρατούσαν στο εσωτερικό του θερμοκηπίου. Αυτό ενισχύεται από την ανάλυση του δείγματος των φυτών μαρτύρων με ελέγχους κανονικότητας (Normality Tests), η οποία έδειξε ότι δεν υπήρχαν σημαντικές διαφορές μεταξύ αυτών, αφού τα φυτά μάρτυρες αποτελούν δείγμα πληθυσμού που ακολουθεί κανονική κατανομή. Οι διαφορές αναφέρονται τόσο στα επίπεδα των τριών κατιόντων, όσο και στα Ξηρά Βάρη των φυτών.

Όσον αφορά τα επίπεδα Mg^{2+} και K^+ στα φύλλα των φυτών που υπέστησαν έλλειψη και επανατροφοδότηση, παρατηρείται παρόμοια διακύμανση χωρίς σημαντικές αποκλίσεις και για τις δυο περιόδους. Τα βέλτιστα επίπεδα αποκτώνται μετά από 1 ημέρα επανατροφοδότηση με πλήρες διάλυμα. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά των φυτών τριανταφυλλιάς, όταν εκτίθενται σε συνθήκες έλλειψης στα δυο αυτά στοιχεία, είναι παρόμοια για τις δυο πειραματικές περιόδους που μελετήθηκαν (θερινή-εαρινή). Κατά τη διάρκεια των δυο περιόδων οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν στο χώρο του θερμοκηπίου ήταν διαφορετικές, με τις μέσες τιμές της R_s (Ηλιακής ακτινοβολίας) και της T (θερμοκρασίας) να είναι 336 W m^{-2} και $31,2^\circ\text{C}$, αντίστοιχα για την περίοδο P1 και 176 W m^{-2} και $20,5^\circ\text{C}$, αντίστοιχα για την περίοδο P2. Επομένως η συμπεριφορά των φυτών όσον αφορά και τις δυο περιόδους δεν επηρεάστηκε σημαντικά από τις κλιματικές συνθήκες, όσο από την έκθεση σε συνθήκες έλλειψης. Για την περίοδο P2, παρατηρούμε ότι και για τα δυο στοιχεία

τα βέλτιστα επίπεδα στους βλαστούς και τις ρίζες, ανακτώνται ακόμα και μετά από 7 ημέρες έλλειψης. Η επανάκτησή τους είναι βραδεία και η περιεκτικότητα των δυο στοιχείων φτάνει στα βέλτιστα επίπεδα ύστερα από 7 ημέρες επανατροφοδότησης. Αντίθετα τα άνθη δεν παρουσιάζουν διαφορές, λόγω του γεγονότος ότι και τα δυο στοιχεία είναι ευκίνητα στο φλοίωμα, διαμέσου του οποίου τροφοδοτούνται στα άνθη, όντας εκτεθειμένα σε συνθήκες έλλειψης (Mengel και Kirkby, 1987, Marschner, 1995).

Όσον αφορά τα επίπεδα Ca^{2+} στα φύλλα, τα φυτά παρουσιάζουν ελαφρώς διαφορετική συμπεριφορά για τις δυο περιόδους. Στην περίοδο P2, μόνο με 3 ημέρες έλλειψη εμφανίζονται διαφορές, χωρίς όμως να εμφανίζονται με 7 ημέρες έλλειψη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην επίδραση της διαπνοής στη μεταφορά Ca^{2+} από τη ρίζα προς τα φύλλα. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα, τα επίπεδα του στοιχείου στη ρίζα και εν μέρει στο βλαστό να είναι αρκετά μειωμένα. Από το Σχήμα 13 φαίνεται ότι μετά από 7 ημέρες έλλειψη το Ca^{2+} στη ρίζα των φυτών που υπέστησαν μεταχείριση, είναι κατά 60% περίπου μειωμένο σε σχέση με τα επίπεδα του στοιχείου στα φυτά μάρτυρες. Στο Σχήμα 12 φαίνεται ότι μετά από 7 ημέρες έλλειψη το Ca^{2+} στο βλαστό των φυτών υπό μεταχείριση, είναι κατά 40% περίπου μειωμένο. Για την περίοδο P1, παρατηρούμε μια σχετική καθυστέρηση στην επανάκτηση των βέλτιστων επιπέδων Ca^{2+} στα φύλλα. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στις πολύ υψηλές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (Rs) και θερμοκρασίας (T), που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της επανατροφοδότησης των φυτών, συνθήκες οι οποίες είναι ικανές να προκαλέσουν υδατικό στρές στα φυτά με αποτέλεσμα να περιοριστεί ή να διακοπεί η διαπνοή (Jackson κ.ά, 1981).

Κατά τη διάρκεια της περιόδου P2, παρατηρείται καθυστέρηση στην ανάκτηση των βέλτιστων επιπέδων Ca^{2+} στα άνθη των φυτών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι το συγκεκριμένο στοιχείο είναι δυσκίνητο κατά τη μετακίνησή του στο φλοίωμα διαμέσου του οποίου τροφοδοτούνται τα άνθη (Marschner, 1995). Αν και παύουν να υφίστανται σημαντικές διαφορές ύστερα από 7 ημέρες επανατροφοδότησης, οι επιπτώσεις της έλλειψης Ca^{2+} στα άνθη χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, διότι το Ca^{2+} παίζει καθοριστικό ρόλο στη μετασυλλεκτική διάρκεια ζωής των δρεπτών τριαντάφυλλων και επομένως στην εμπορική τους αξία (Michalczac κ.ά., 1989, Nilsen κ.ά., 1999, Mortensen κ.ά., 2001).

5.2 Επίδραση της έλλειψης Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ στην παραγωγή Ξηρού Βάρους

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, φαίνεται ότι η έκθεση των φυτών σε συνθήκες έλλειψης Ca^{2+} , και K^+ δεν είχε καμία επίδραση στην παραγωγή Ξηρού Βάρους. Στην περίπτωση της έκθεσης των φυτών σε συνθήκες έλλειψης Mg^{2+} παρουσιάζονται σημαντικές διαφορές για 7 ημέρες έλλειψη οι οποίες παύουν να υφίστανται μετά από μια μέρα επανατροφοδότηση με πλήρες θρεπτικό διάλυμα. Τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα, ότι τα φυτά που υπέστησαν έλλειψη και στη συνέχεια επανατροφοδότηση με τα συγκεκριμένα θρεπτικά στοιχεία, παρουσιάζουν τον ίδιο ρυθμό αύξησης με τα φυτά μάρτυρες. Παρόμοια συμπεράσματα παρουσιάζουν για φυτά τομάτας και για τα στοιχεία Ca^{2+} και K^+ αντίστοιχα, οι ερευνητές: Morard κ.ά. (1996) και οι Pujos και Morard, (1997).

Το παραπάνω συμπέρασμα, είναι ιδιαίτερης σημασίας για την παραγωγή δρεπτικών ανθέων, διότι η εμπορική αξία ιδιαίτερα στα τριαντάφυλλα, καθορίζεται με βάση το μήκος βλαστού και το πάχος της διαμέτρου (Morisot, A., 1995), στοιχεία άμεσα συνδεδεμένα με την παραγωγή ξηράς ουσίας. Επομένως θα πρέπει να γίνει εκτενέστερη μελέτη των επιδράσεων έλλειψης των τριών κατιόντων και σε άλλες παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την εμπορική αξία των δρεπτικών ανθέων, όπως η αύξηση του μήκους των βλαστών.

Ως γνωστόν οι συγκεντρώσεις των θρεπτικών στοιχείων στα επιμέρους φυτικά μέρη, εξαρτώνται αφενός μεν από τις ποσότητες αυτών με τις οποίες τροφοδοτείται το ριζικό σύστημα, αφετέρου δε από την ποσότητα ξηράς ουσίας που παράγεται από το φυτό. Έτσι, είναι δυνατόν τα επίπεδα ενός στοιχείου όταν εκφράζονται ως % ποσοστό του Ξηρού Βάρους, να φαίνονται σύμφωνα προς τις βέλτιστες τιμές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία, εντούτοις όμως να υπολείπονται κατά πολύ των επιπέδων που εξασφαλίζουν απρόσκοπτη αύξηση και ανάπτυξη των φυτών. Αυτό μπορεί να οφείλεται στις μειωμένες τιμές ξηρού βάρους στα φυτά υπό μελέτη, σε σχέση με φυτά μάρτυρες. Σημαντικές διαφορές όμως, δεν παρατηρούνται στα Ξηρά Βάρη κατά την περίοδο επανατροφοδότησης, γεγονός που ενισχύει τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα για τα επίπεδα των στοιχείων, όταν αυτά εκφράζονται ως % ποσοστό Ξηρού Βάρους.

Αν και οι μεταβολές του Ξ.Β. στα επιμέρους φυτικά μέρη (για την περίοδο P2) δεν παρουσιάζονται, εντούτοις κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι κατά την περίοδο της επανατροφοδότησης, δεν εμφανίζονται στατιστικώς σημαντικές διαφορές, λόγω έκθεσης σε συνθήκες έλλειψης και για τα τρία στοιχεία.

Από τα ανωτέρω προαναφερθέντα, παρατηρείται ότι για την καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, η έκθεση σε συνθήκες έλλειψης δεν είχε καμία επίδραση ούτε στις βέλτιστες τιμές των επιπέδων των τριών κατιόντων ούτε στην παραγωγή βιομάζας, για την εαρινή και καλοκαιρινή καλλιεργητική περίοδο. Ταυτόχρονα δε παρατηρούμε ότι το χρονικό διάστημα που δύναται να μεσολαβεί μεταξύ δυο διαδοχικών ελέγχων, δηλαδή ο χρόνος επέμβασης για τη διόρθωση των τιμών των παραπάνω στοιχείων στο θρεπτικό διάλυμα, χωρίς να παρατηρούνται προβλήματα στην καλλιέργεια, είναι περίπου επτά ημέρες. Τα συμπεράσματα αυτά είναι δυνατόν να αποτελέσουν χρήσιμο οδηγό για την καλύτερη διαχείριση θρεπτικού διαλύματος σε κλειστή υδροπονική καλλιέργεια τριανταφυλλιάς, ανεξαρτήτως στρατηγικής διαχείρισης ή συστήματος που χρησιμοποιείται και ανεξάρτητα με το σε ποιο βαθμό αυτοματοποιημένη είναι η διαδικασία (απλή χρήση H/Y ή έμπειρα συστήματα).

5.3 Προοπτικές

Ιδιαίτερα στην περίπτωση των έμπειρων συστημάτων τα οποία είναι στο στάδιο της έρευνας, τα συμπεράσματα γύρω από την παράμετρο “χρόνος”, θα συμβάλλουν σημαντικά στον ακριβή και έγκαιρο χρονικά έλεγχο του θρεπτικού διαλύματος σε κλειστό υδροπονικό σύστημα, καλλιέργειας τριανταφυλλιάς. Ολοκληρωμένη εικόνα συμπεριφοράς της καλλιέργειας θα μπορούσε να δώσει η μελέτη της συμπεριφοράς της συγκεκριμένης καλλιέργειας σε συνθήκες έκθεσης και για τα υπόλοιπα θρεπτικά στοιχεία (ήδη πραγματοποιούνται παρόμοια πειράματα για τα στοιχεία S,P και N, στο εργαστήριο Γεωργικών Κατασκευών και Ελέγχου Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας). Επόμενο βήμα προς την ίδια κατεύθυνση θα αποτελούσε η μελέτη της συμπεριφοράς της καλλιέργειας, για όλα τα βασικά επιμέρους θρεπτικά στοιχεία, κάτω από διαφορετικές κλιματικές συνθήκες (θάλαμοι ανάπτυξης-growth chambers), ούτως ώστε να υπάρξει μια πιο

αναλυτική καταγραφή της επίδρασης της έλλειψης θρεπτικών και κατ' επέκταση διερεύνηση των στρατηγικών ελέγχου του θρεπτικού διαλύματος.

Όπως αναφέρθηκε και στο 1^ο μέρος, στα σύγχρονα υπό ανάπτυξη έμπειρα συστήματα διαχείρισης, ο χρόνος επέμβασης είναι υψίστης σημασίας. Η έρευνα γύρω από το συγκεκριμένο πεδίο είναι αρκετά ελλιπής με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν παρά ελάχιστες πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά διαφόρων καλλιεργειών. Από τη στιγμή που θα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε, τουλάχιστον για τις μεγαλύτερου εμπορικού ενδιαφέροντος θερμοκηπιακές καλλιέργειες, τη συμπεριφορά των καλλιεργειών κάτω από συνθήκες έλλειψης διαφόρων θρεπτικών και για διαφορετικές κλιματικές παραμέτρους, τότε η ενσωμάτωση του χρόνου στα συστήματα αυτά θα αποτελεί μια πραγματικότητα και η διαχείριση (έλεγχος-ρύθμιση) του θρεπτικού διαλύματος θα είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adams, P., 1980. Nutrient uptake by cucumbers from recirculating solution. *Acta Hort.*, 98:119-126.
- Adams, P., Grimmett, M.M., 1986. Some responses of tomatoes to the concentration of potassium in recirculating solutions. *Acta Hort.*, 178:29-35.
- Adams, P., Massey, D.M., 1984. Nutrient uptake by tomatoes from recirculating solutions. In: *Proc.6th Internat. Congr. Soiless Culture*, Lunteren 1984. ISOSC, Wageningen, The Netherlands: pp. 71-79.
- Agricultural Structure Memorandum (1989). Dutch Ministry of Agriculture, Nature Management and Fisheries. The Hague, pp. 174.
- Amsing, J.J., 1995. *Gnomonia radicola* and a *Phytophthora* species as causal agents of root rot on roses in artificial substrates. *Acta Hort.*, 382:203-211.
- Attenburrow, D.C., Waller, P.L., 1980. Sodium chloride: Its effect on nutrient uptake and crop yields with tomatoes in NFT. *Acta Hort.*, 98:229-236.
- Bailey, B.J., Haggett B.G.D., Hunter, A., Albery, W.J., Svanberg, L.R., 1988. Monitoring nutrient film solutions using ionselective electrodes. *J. Agric. Eng. Res.* 40(88)2:129-142.
- Bangerth, F., 1979. Calcium-related physiological disorders of plants. *Ann. Rev. Phytopathology* 17, 97-122.
- Bar-Tal, A., 1999. The significance of root size for plant nutrition in intensive horticulture. In: Rengel, Z. (ed). *Mineral Nutrition of Crops: Fundamental Mechanisms and Implications*. Haworth Press, Inc. NY, USA: pp.115-139.
- Bar-Yosef, B., Markovich, T., Levkovich, I., 2001a. Pepper response to leachate recycling in a greenhouse in Israel. *Acta Hort.*, 548:357-364.
- Bar-Yosef, B., Markovich, T., Levkovich, I., 2001b. *Gypsophila paniculata* response to leachate recycling in a greenhouse in Israel. *Acta Hort.*, 554:193-204.
- Bowe, R., Reinelt, J., 1991. Edelnelken in NFT-Kultur. *Deutscher Gartenbau*, 45(3):138-140.
- Cacco, G., Saccomani, M., Ferrari, G., 1977. Development of sulfate uptake capacity and ATP-sylfurylase activity during root elongation in maize. *Plant Physiol.*, 60:582-584.

- Challa, H., Bakker, J.C., 1995. Crop growth. In: Bakker, J.C., G.P.A. Bot, H. Challa, and N.J. van de Braak (eds): Greenhouse Climate Control, An Integrated Approach. Wageningen Pres, The Netherlands: pp. 15-124.
- Cooper, A.J., 1979. the ABC of NFT. Grower Bokks, London
- Davies, J.M.L., 1981. Alternative wilt controls. Grower, Jan. 15:19-21.
- De Kreij, C., 1995. Latest insights into water and nutrient control in soilless cultivation. Acta Hort., 408:47-61.
- Drew, M.C., Saker, L.R., Barber, S.A., Jenkins, W., 1984. Changes in the kinetics of phosphate and potassium absorption in nutrient-deficient barley roots measured by a solution-depletion technique. Planta 160:490-499.
- Dugger, W.M., 1973. Functional aspects of boron in plants. Adv. Chem. Ser., 123:112-129.
- Epstein, E., Rains, D.W., Elzam, O.E., 1963. Resolution of dual mechanisms of potassium absorption by barley roots. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 49:684-692.
- Ericsson, T., 1995. Growth and shoot:root ration of seedlings in relation to nutrient availability. Plant and Soil, 168/169:205-214.
- Ericsson, T., Kahr, M., 1995. Growth and nutrition of birch seedlings at varied relative addition rates of magnesium. Tree Physiology, 15:85-93.
- Evans, M.R., Konduru, S., Stamps, R.H., 1996. Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. HortSci., 31:965-967.
- Fakhri, M.N., Maloupa, E., Gerasopoulos, D., 1995. Effects of substrate and frequency of irrigation on yield and quality of three *Gerbera jamesonii* cultivars. Acta Hort., 408:41-45.
- Forde, B.G., Clarkson, D.T., 1999. Nitrate and ammonium nutrition of plants: Physiological and molecular perspectives. Adv. Botan. Res., 30:1-90.
- Gericke, W.F., 1937. Hydroponics-crop production in liquid culture media. Science, 85:177-178.
- Gieling, Th.H., van Os, E.A., de Jager, A., 1989. The application of chemosensors and bio-sensors for soilless cultures. Acta Hort., 230:357-362.
- Heinen, M., Harmanny, K., 1992. Evaluation of the performance of ion-selective electrodes in an automated NFT system. Acta Hort., 304:273-280.

- Hoagland, D.R., Arnon, D.I., 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Calif. Agric. Exp. St., Circ. 347 (Revised by D.I. Arnon).
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter Jr, P.J., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17: 1133-1138.
- Johnson, C.M., Stout, P.R., Broyer, T.C., Carlton, A.B., 1957. Comparative chlorine requirements of different plant species. *Plant Soil*, 8:337-353.
- Kipp, J.A., Wever, G., De Kreij, C., 1999. *International Substrate Manual*. Elsevier, The Netherlands, 122 pp.
- Kirkby, E.A., Pilbeam, D.J., 1984. Calcium as a plant nutrient. *Plant Cell Environ.* 7:397-405.
- Knop, W., 1860. Ein Vegetationsversuch. *Die Landwirtschaftlichen Versuchs-Stationen*, 1:181-202.
- Le Bot, J., Adamovich, S., Robin, P., 1998. Modeling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Sci. Hort.*, 74:47-82.
- Lemaire, F., 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Hort.*, 396:273-284.
- Maloupa, E., Gerasopoulos, D., Zervaki, D., Traka-Mavrona, A., 1999. Evolution of soilless culture technique in Greece. A look into the future. In: *Regional Group Greenhouse Crop Production in the Mediterranean Region. Proc. 1st Meeting FAO Thematic Working Group Soilless Culture. Technical Publication No 3. Halkidiki, Greece, 2 September 1999: pp. 46-63.*
- Marschner, H., 1995. *Mineral nutrition of higher plants*, 2nd edn. London: Academic Press.
- Massey, D.M., Winsor, G.W., 1980a. Some responses of tomatoes to nitrogen in recirculating solutions. *Acta Hort.*, 98:127-133.
- Massey, D.M., Winsor, G.W., 1980a. Some responses of tomato plants to phosphorus concentration in nutrient film culture. In: *Proc., 5th Internat. Congr. Soilless Culture. ISOSC, Wageningen, The Netherlands: pp.205-213.*
- McPherson, G.M., Harriman, M.R., Pattison, D., 1995. The potential for spread of root diseases in recirculating hydroponics system and their control with disinfection. *Med. Fac. Landbouww. Univ. Gent*, 60/2b:371-379.

- Mengel, K., Kirkby, E.A., 1987. Principles of Plant Nutrition (4th Edition), Section 7.2.2. Intern. Potash Inst., Bern, Switzerland: pp.366-370.
- Michalczyk, B., Goszczynska, D.M., Rudnicki, R.M., Halevy, A.H., 1989. Calcium promotes longevity and bud opening in cut rose flowers. *Israel J. Bot.*, 38:209-215.
- Morard, P., Benavides, B., 1990. Relative accumulation of macronutrient ions in different parts of cucumber (*Cucumis sativus*). *Sci. Hort.*, 44: 17-30.
- Morard, P., Pujos, A., Bernadac, A., Bertoni, G., 1996. Effect of temporary calcium deficiency on tomato growth and mineral nutrition. *J. Plant Nutr.*, 19(1):115-127.
- Morisot, A., 1995. "P.P. ROSE": An empirical model predict the potential yield of cut roses. *Acta Hort.* 424. 2nd International Symposium on Roses pp. 87-93.
- Mortensen, L.M., Ottosen, C.O., Gislerod, H.R., 2001. Effects of air humidity and K:Ca ratio on growth, morphology, flowering and keeping quality of pot roses. *SciHort.*, 90:131-141.
- Multiyear Crop Protection Plan (1991). Dutch Ministry of Agriculture, Nature Management and Fisheries, The Hauge, 298 pp.
- National Environmental Policy Plan (1998). Dutch Ministry of Housing, Planning and the Environment. The Hauge, 258 pp.
- Nilsen, B., Starkey, K.R., 1999. Influence of production factors on postharvest life of potted roses. *Postharvest Biol. Techn.*, 16:157-167.
- Noguera, P., Abad, M., Noguera, V., Puchades, R., Maquieira, A., 2000. Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. *Acta Hort.*, 517:279-286.
- Orozco, R., Marfa, O., 1995. Granulometric alteration, air entry potential and hydraulic conductivity in perlites used in soilless cultures. *Acta Hort.*, 408:147-161.
- Pujos, A., Morard, P., 1997. Effects of potassium deficiency on tomato growth and mineral nutrition at the early production stage. *Plant and Soil*, 189:189-196.
- Raviv, M., Krasnovsky, A., Medina, S., Reuveni, R., 1998. Assessment of various control strategies for recirculation of greenhouse effluents under semi-arid conditions. *J. Hort. Sci.*, 73:485-491.

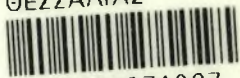
- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., Bar-Tal, A., 2002. Substrates and their Analysis. In: D. Savvas, H. Passam, (eds). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo Publications, Athens, Greece: pp. 25-101.
- Ruijs, M.N.A., Van Os, E.A., 1991. Economic evaluation of business systems with a lower degree of environmental pollution. *Acta Hort.*, 295:79-84.
- Ruijs, M.N.A., 1994. Economic evaluation of closed production systems in glasshouse horticulture. *Acta Hort.*, 340:87-94.
- Rupp, L.A., Dudley, L.M., 1989. Iron availability in rockwool may affect rose nutrition. *HortSci.*, 24:258-260.
- Savvas, D., 2001. Nutritional management of vegetables and ornamental plants in hydroponics. In: Dris, R., Niskanen, R., Jain, S.M., (eds). Crop Management and Postharvest Handling of Horticultural Products. Volume I: Quality Management. Science Publishers, Enfield, N.H., U.S.A.: pp.37-87.
- Savvas D., 2002. Nutrient solution recycling. In: D. Savvas, H. Passam, (eds). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo Publications, Athens, Greece: pp. 299-339.
- Savvas D., Lenz, F., 1995. Nährstoffaufnahme von Aubergine (*Solanum melongena* L.) in Hydrokultur. *Gartenbauwissenschaft*, 60:29-30.
- Savvas D., Manos, G., 1999. Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems. *J. Agric. Engin. Res.*, 73:29-33.
- Schiff, J.A., Hodson, R.C., 1973. The metabolism of sulfate. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 24:381-414.
- Smith, D.L., 1987. Rockwool in Horticulture. Grower Books, London, U.K.
- Sonneveld, C., Voogt, S.J., 1980. The application of manganese in nutrient solutions for tomatoes grown in a recirculating system.
- Sonneveld, C., 1981. Items for application of macro-elements in soilless culture. *Acta Hort.*, 126:187-195.
- Sonneveld, C., 1995. Fertigation in the greenhouse industry. In: Dahlia Greidinger Internat. Symposium on Fertigation. Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel: pp.121-140.
- Sonneveld, C., 1997. Mineralenopname bij teelten onder glas. Proefstation voor Bloemistelij en Glsgroente. Intern. Verslag 81,35 pp.

- Sonneveld, C., 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Thesis, Wageningen University, The Netherlands, 151 pp.
- Sonneveld, C., Straver, N., 1994. Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. Research Station for Horticulture and Glasshouse Vegetables, Aalsmeer/Naaldwijk, The Netherlands, Series: Voedingsoplossingen Glastuinbouw, no 8, 45 pp.
- Steiner, A.A., 1968. Soilless culture. Proc. 6th Coll. Intern. Potash Inst. Florence/Italy. Intern. Potash Inst., Bern, Switzerland: pp.324-341.
- Steiner, A.A., 1976. Nomenclature with hydroponics. In: Proceedings, 4th International Congress on Soilless Culture. IWOSC, Wageningen, The Netherlands: pp.19-20.
- Steiner, A.A., 1980. The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. Acta Hort., 98:87-97.
- Steiner, A.A., 1984. The Universal nutrient solution. Proc. 6th Intern. Congr. Soilless Culture, Lunteren 1984.ISOSC, Wageningen, The Netherlands: pp.633-649.
- Tamini Y., Matsuyama T., Kimberly D., Richard Nakano T., 1999. Distribution of nutrients in cut-flower roses and the quantities of biomass and nutrients removed during harvest. Hortscience 34(2): 251-253.
- Urrestarazu, M., Garcia, M., 2000. Modeling electrical conductivity management in a recirculating nutrient solution under semi-arid conditions. J. Plant Nutr., 23:457-468.
- Van Der Ende, W., Breuring, R., 1983. Rozen op Steenwol (2)-Voeding in der Steenwolteelt. Vakblad voor de Bloemisterij, No 45:44-45.
- Van Os, E.A., Ruijs, M.N.A., Van Weel, P.A., 1991. Closed business systems for less pollution from greenhouses. Acta Hort., 294:49-57.
- Van Os, E.A., 1999. Closed soilless growing systems: a sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture. Water Science and Technology, 39:105-112.
- Verdonck, O., De Vleeschauwer, D., De Boodt, M., 1981. The influence of the substrate to plant growth. Acta Hort., 126:251-258.

- Vewer, F.L., Welleman, J.J., 1980. The possibilities of Grodan rockwool in horticulture. In: Proc. 5th Internat. Congr. Soilless Culture. ISOSC, Wageningen, The Netherlands: pp.263-277.
- Voogt, W., Sonneveld, C., 1997. Nutrient management in closed growing systems for greenhouse production. In: Goto, E., K. Kurate, and M. Hayashi (eds). Plant Production in Closed Ecosystems. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands: pp.83-102.
- White J.W., 1987. Fertilization. In: Langhans, R.W. (ed), Roses. Roses Incorporated, Haslett, MI, pp. 87-135.
- Wilson, G.C.S., 1984. Effects of additives to peat on the air and water capacity. Acta Hort., 172:207-209.
- Wohanka, W., 2002. Nutrient Solution Disinfection. In: D. Savvas, H. Passam, (eds). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo Publications, Athens, Greece: pp. 299-372.
- Zekki, H., Gauthier, L., Gosselin, A., 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. J.Am. Soc.Hort.Sci., 121(6):1082-1088.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000074267